

EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE INTERPOLACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA

DIANA PATRICIA ZULUAGA PULGARÍN

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Daniel González Duque

**Ingeniero Ambiental, candidato a MSc. en Ingeniería de
Recursos Hidráulicos**



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA AMBIENTAL
ENVIGADO
2018**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1 PRELIMINARES.....	16
1.1 Planteamiento del problema	16
1.2 Objetivos del proyecto	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Marco de referencia.....	18
1.3.1 Antecedentes	18
1.3.2 Marco teórico.....	20
2 METODOLOGÍA.....	27
2.1 Fase 1: Selección de metodologías de interpolación	27
2.2 Fase 2: Procesamiento de información primaria y secundaria de radiación solar y de variables externas	28
2.2.1 Definición de variables externas	28
2.2.2 Recolección de información.....	28
2.2.3 Tratamiento de la información	28
2.2.4 Delimitación regional	28
2.3 Fase 3: Elaboración de las interpolaciones.....	29
2.3.1 Determinación de software	29
2.3.2 Definición de parámetros.....	29
2.3.3 Validación de resultados.....	29
2.3.4 Ejecución de las interpolaciones.....	30

2.4	Fase 4: Aplicación de modelo de conversión de brillo solar a irradiación.....	30
2.4.1	Cálculo de parámetros.....	30
2.4.2	Generación de mapas de irradiación	31
2.4.3	Validación de resultados.....	32
2.5	Fase 5: Análisis comparativo	32
2.5.1	Análisis de estadísticos	32
2.5.2	Análisis de mapas de radiación	32
2.5.3	Elección de la mejor metodología	32
3	DATOS.....	33
3.1	Información primaria.....	33
3.2	Información secundaria	33
3.3	Delimitación regional	36
3.3.1	Zonificación hidrográfica.....	36
3.3.2	Zonificación climática.....	37
4	SELECCIÓN DE METODOLOGÍAS DE INTERPOLACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA.....	39
4.1	Selección de metodologías de interpolación.....	39
4.2	Procesamiento de información	41
4.2.1	Análisis de correlación.....	41
4.2.2	Análisis de información secundaria.....	43
4.2.3	Tratamiento de información primaria	44
4.2.4	Delimitación regional	45
5	INTERPOLACIONES ANUALES DE BRILLO SOLAR E IRRADIACIÓN	50
5.1	Brillo solar.....	51
5.1.1	Elaboración de las interpolaciones	51

5.1.2	Presentación de resultados	54
5.2	Irradiación.....	66
5.2.1	Presentación de resultados	66
5.2.2	Análisis estadístico de residuales	67
5.3	Elección de la mejor metodología de interpolación	72
6	INTERPOLACIONES MENSUALES DE BRILLO SOLAR E IRRADIACIÓN	74
6.1	Brillo solar.....	75
6.1.1	Variogramas	75
6.1.2	Mapas mensuales	78
6.2	Irradiación.....	80
6.2.1	Modelo Ångström–Prescott	80
6.2.2	Mapas mensuales	86
6.2.3	Ciclo anual de irradiación	89
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES.....	92
7.1	Trabajos futuros.....	93
8	REFERENCIAS	95
ANEXO 1	.....	99
ANEXO 2	.....	108
ANEXO 3	.....	117
ANEXO 4	.....	119
ANEXO 5	.....	123
ANEXO 6	.....	125
ANEXO 7	.....	127
ANEXO 8	.....	129

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resumen de estudios climáticos en donde se aplican las metodologías de interpolación seleccionadas.....	39
Tabla 2. Promedios mensuales y anual multianual de brillo solar expresados en horas por día (h/día) para una estación en particular.....	44
Tabla 3. Parámetros con sus valores modificados para IDW, TPS, OK y UK, y su respectiva codificación.....	50
Tabla 4. Tipos de función Kernel y su parámetro asociado dentro de los RBFs.....	51
Tabla 5. Valores óptimos de potencia para los conjuntos de datos de prueba de brillo solar.	52
Tabla 6. Tipos de modelo del variograma.	53
Tabla 7. Cálculo de estadísticos MBE, RMSE y MBE, y valor mínimo y máximo de la diferencia entre los valores reales y predichos, a partir de los tres conjuntos de datos de validación de brillo solar para cada combinación de parámetros. MBE y RMSE expresados en horas y MBES expresado como porcentaje.	54
Tabla 8. Combinaciones de parámetros con los mejores resultados para el MBE, RMSE y MBE por metodología de interpolación para brillo solar. MBE y RMSE expresados en horas y MBES expresado como porcentaje.	56
Tabla 9. Resumen de estadísticos calculados a partir de los residuales de brillo solar para las 42 combinaciones evaluadas.	60
Tabla 10. Constantes empíricas a y b calculadas a partir de las regresiones lineales entre H/H_0 y n/N	66
Tabla 11. Combinaciones de parámetros con los mejores resultados para el MBE, RMSE y MBE por metodología de interpolación para la irradiación. MBE y RMSE expresados en kWh/m ² y MBES expresado como porcentaje.....	66
Tabla 12. Resumen de estadísticos calculados a partir de los residuales de irradiación para las nueve combinaciones seleccionadas.	68
Tabla 13. Constantes empíricas a y b calculadas a partir de las regresiones lineales entre H/H_0 y n/N para los meses del año en las regiones climáticas.	85

Tabla 14. Localización y periodo de registro de las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM seleccionadas. La altitud, expresada en metros sobre el nivel del mar, y la latitud y longitud, en grados decimales.....	99
Tabla 15. Promedios mensuales y anuales multianuales de brillo solar expresados en h/día de las 276 estaciones seleccionadas del IDEAM.	108
Tabla 16. Localización y periodo de registro de las 17 estaciones de irradiación seleccionadas del IDEAM. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.....	117
Tabla 17. Localización de las 50 estaciones de brillo solar del primer conjunto de validación. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.....	123
Tabla 18. Localización de las 50 estaciones de brillo solar del segundo conjunto de validación. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.	125
Tabla 19. Localización de las 50 estaciones de brillo solar del tercer conjunto de validación. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.....	127
Tabla 20. Localización de las 26 estaciones de brillo solar e irradiación del IDEAM. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.....	129

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Descripción gráfica de un variograma típico.	23
Figura 2. Curva de ajuste de algunos tipos de modelo al variograma.	24
Figura 3. Comportamiento del peso relativo y la distancia para diferentes valores de la potencia p (Lloyd, 2010).	25
Figura 4. Mapa del flujo radiación promedio anual del producto SIS del CLARA-A1, medido en vatios por metro cuadrado por día ($W/m^2/día$).....	34
Figura 5. Mapa de precipitación diaria acumulada promedio anual del producto 3B42 del TRMM, expresada en milímetros por día (mm/día).	35
Figura 6. Mapa del modelo digital de elevaciones del GLOBE, expresado en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).....	36
Figura 7. Zonificación hidrográfica de Colombia adoptada por el IDEAM.....	37
Figura 8. Zonificación climática de Colombia adoptada en este estudio.	38
Figura 9. Diagrama de dispersión de los valores de brillo solar y elevación para las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM, y coeficiente de correlación de Pearson R.....	42
Figura 10. Diagrama de dispersión de los valores de brillo solar y precipitación diaria acumulada para las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM, y coeficiente de correlación de Pearson R.	42
Figura 11. Diagrama de dispersión de los valores de brillo solar y flujo de radiación de onda corta para las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM, y coeficiente de correlación de Pearson R.....	43
Figura 12. Distribución de las 276 estaciones de brillo solar seleccionadas (izquierda) y de las 17 estaciones de irradiación seleccionadas (derecha).	45
Figura 13. Valores medios del ciclo anual de brillo solar para las regiones climáticas.	47
Figura 14. Valores medios del ciclo anual de brillo solar de cada estación para las regiones climáticas.....	48
Figura 15. Tipos de sector de búsqueda del vecindario.	52

Figura 16. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones TPS_Completo, TPS_Cuatro, TPS_Cuatro45°, TPS_Ocho, IDW_P1.5_Completo, IDW_P1.5_Cuatro45°, IDW_P2_Completo, IDW_P2_Cuatro45°, IDW_P3_Completo, IDW_POp_Completo, OK_Estable_Completo y OK_Estable_Cuatro. 57

Figura 17. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones OK_Estable_Cuatro45°, OK_Estable_Ocho, OK_Circular_Cuatro45°, OK_Esférico_Cuatro45°, OK_Tetra_Cuatro45°, OK_Penta_Cuatro45°, OK_Exponen_Cuatro45°, OK_Gaussiano_Cuatro45°, OK_RacQuad_Cuatro45°, OK_EfectoHoyo_Cuatro45°, OK_KBessel_Cuatro45° y OK_JBessel_Cuatro45°. 58

Figura 18. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones UK_DEM_30_Estable, UK_DEM_30_Esférico, UK_DEM_60_Estable, UK_DEM_60_Esférico, UK_DEM_90_Estable, UK_DEM_90_Esférico, UK_TRMM_30_Estable, UK_TRMM_30_Esférico, UK_TRMM_60_Estable, UK_TRMM_60_Esférico, UK_TRMM_90_Estable y UK_TRMM_90_Esférico. 59

Figura 19. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones UK_CLARA_30_Estable, UK_CLARA_30_Esférico, UK_CLARA_60_Estable, UK_CLARA_60_Esférico, UK_CLARA_90_Estable y UK_CLARA_90_Esférico. 60

Figura 20. Diagrama de Caja y Bigote para los residuales de brillo solar de las nueve combinaciones seleccionadas. 62

Figura 21. Curvas ajustadas y optimizadas para el variograma de las combinaciones OK_Esférico_Cuatro45° (izquierda arriba), OK_EfectoHoyo_Cuatro45° (derecha arriba), UK_TRMM_90_Esférico (izquierda abajo) y UK_CLARA_60_Estable (derecha abajo). .. 63

Figura 22. Mapas interpolados anuales de brillo solar medido en horas por día (h/día) para las nueve combinaciones de parámetros seleccionadas..... 65

Figura 23. Histograma de frecuencia de los residuales de irradiación para las nueve combinaciones seleccionadas. 68

Figura 24. Diagrama de Caja y Bigote para los residuales de irradiación de las nueve combinaciones seleccionadas. 69

Figura 25. Mapas anuales de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (kWh/m²/día) para las nueve combinaciones de parámetros seleccionadas. 71

Figura 26. Mapa de error estándar de la interpolación de brillo solar con UK_CLARA_60_Estable realizada con los valores anuales de las 276 estaciones de brillo solar..... 73

Figura 27. Curvas ajustadas y optimizadas para el variograma de las interpolaciones mensuales de brillo solar con la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el primer semestre del año. 76

Figura 28. Curvas ajustadas y optimizadas para el variograma de las interpolaciones mensuales de brillo solar con la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el segundo semestre del año.	77
Figura 29. Mapas interpolados mensuales de brillo solar expresado en horas por día (h/día) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el primer semestre del año.	78
Figura 30. Mapas interpolados mensuales de brillo solar expresado en horas por día (h/día) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el segundo semestre del año.	79
Figura 31. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott para la región Andes.	81
Figura 32. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott para la región Pacífico.	82
Figura 33. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott de cada mes para la región Orinoco-Amazonía.	83
Figura 34. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott de cada mes para la región Caribe.	84
Figura 35. Ecuaciones del modelo Ångström-Prescott de los meses del año para las regiones climáticas.	85
Figura 36. Mapas mensuales de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el primer semestre del año.	87
Figura 37. Mapas mensuales de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el segundo semestre del año.	88
Figura 38. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) de 12 municipios de la región Andes.	89
Figura 39. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) de 8 municipios de la región Caribe.	90
Figura 40. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) de 2 municipios de la región Pacífico.	90

Figura 41. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) de 7 municipios de la región Orinoco-Amazonía..... 91

Figura 43. Valores medios del ciclo anual de brillo solar para las regiones hidrográficas expresados en h/día. 120

Figura 44. Valores medios del ciclo anual de brillo solar de cada estación para las regiones hidrográficas expresados en h/día. 122

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1	99
Anexo 2	108
Anexo 3	117
Anexo 4	119
Anexo 5	123
Anexo 6	125
Anexo 7	127
Anexo 8	129

RESUMEN

La estimación de la irradiación en un territorio es un insumo necesario para el desarrollo de proyectos de generación de energía solar. Es importante contar con una buena caracterización del recurso solar que haga eficientes la ubicación y el dimensionamiento de este tipo de instalaciones. Actualmente, la caracterización espacial de la radiación solar en Colombia proviene del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia presentado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, en el cual se muestran mapas de brillo solar e irradiación global horizontal a escalas mensual y anual para todo el territorio nacional a partir de información medida en tierra, aplicando la técnica de interpolación ponderación por el inverso de la distancia (IDW, por sus siglas en inglés). Aunque IDW es una buena aproximación para estimar campos de radiación, genera patrones circulares anormales en la superficie interpolada alrededor de los puntos de medición y asume que el comportamiento espacial de las variables es únicamente dependiente de la distancia, lo que puede traer consigo algunos problemas. Esto hace indispensable que se evalúen otras metodologías que puedan generar mejores resultados, especialmente en zonas con baja cobertura de estaciones.

En este estudio, se evaluaron 42 combinaciones de parámetros asociados a las metodologías de interpolación IDW, splines de plato delgado (TPS, por sus siglas en inglés), kriging ordinario (OK, por sus siglas en inglés) y kriging universal (UK, por sus siglas en inglés), para generar mapas anuales de brillo solar usando información medida en tierra proveniente 276 estaciones, e información derivada de satélite de precipitación acumulada, elevación y flujo de radiación de onda corta. Se seleccionaron nueve combinaciones de parámetros que presentaron los menores errores, para las cuales se generaron mapas anuales de brillo solar. Se implementó el modelo Angström-Prescott para convertir brillo solar en irradiación, generando mapas de irradiación basados en una zonificación climática que divide el país en cuatro regiones con climatología común: Andes, Pacífico, Orinoico-Amazonía y Caribe. La combinación que mejor desempeño mostró usó la metodología de interpolación UK e información secundaria de flujo de radiación de onda corta. Para brillo solar, esta combinación presentó un error medio aritmético (MBE, por sus siglas en inglés) de 0,163 horas, un error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) de 0,817 horas y un error medio aritmético estandarizado (MBES, por sus siglas en inglés) de 3,5%. Para irradiación, presentó un MBE de 0,146 kWh/m²/día, un RMSE de 0,434 kWh/m²/día y un MBES de 3,4%, arrojando el RMSE más bajo entre las 42 combinaciones evaluadas, y unos mapas que lograron exhibir el comportamiento espacial esperado de las variables e identificar los elementos principales de la orografía colombiana. Adicionalmente, se generaron campos mensuales de brillo solar e irradiación usando la mejor combinación.

Los resultados obtenidos permiten aportar herramientas para mejorar las estimaciones en el futuro. Este estudio se constituye como un recurso importante para el desarrollo de proyectos de generación fotovoltaica en Colombia y para poder nutrir el conocimiento del público en general sobre el comportamiento de esta variable.

Palabras clave:

Brillo solar, irradiación, metodologías de interpolación, modelo Angström-Prescott

ABSTRACT

Estimating the amount of solar radiation within a territory is a great tool for the development of projects related to solar energy generation. It is important to have a good understanding of the solar resource to make the placement and sizing of new facilities of this type of project more efficient, in relation to the prevailing weather conditions. Currently, the characterization of solar radiation in Colombia comes from 'Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia' provided by the Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, which presents monthly and annual sunshine duration and global horizontal radiation maps for the domestic region, based on ground-measured data while applying the inverse distance weighting (IDW) interpolation technique. Although IDW is a good approximation to determine interpolated radiation surfaces, it generates abnormal circular patterns on the interpolated surface around the measurement points and assumes a dependence on the spatial behavior of the variables with distance, which may present some problems. It is essential to evaluate other interpolation techniques that can generate better results, especially in areas with low station density.

In this study, 42 combinations of parameters associated with IDW, thin-plate splines (TPS), ordinary kriging (OK) and universal kriging (UK) interpolation techniques were evaluated to obtain annual sunshine duration maps using ground-measured data from 276 stations and satellite-derived information of elevation, accumulated precipitation and short-wave radiation flux. Nine combinations of parameters were selected for showing the lowest errors, for which annual sunshine duration maps were generated. The Angström-Prescott model was used to convert sunshine duration into solar radiation, generating annual solar radiation maps based on a climate zoning that divided the country into four regions with a common climate: Andes, Pacific, Orinoco-Amazon and Caribbean. The best performance combination used UK as interpolation technique and short-wave radiation flux as secondary information provided by the CLARA-A1 dataset. For sunshine duration, this combination presented a mean bias error (MBE) of 0,163 hours, a root mean square error (RMSE) of 0,817 hours and a mean bias error standardized (MBES) of 3,5%. For solar radiation, this combination presented a MBE of 0,146 kilowatt hour, a RMSE of 0,434 kilowatt hour and a MBES of 3,4%, presenting the lowest RMSE among the 42 evaluated combinations, and maps that exhibit the expected spatial behavior of the variables and show the main elements of the Colombian orography. In addition, monthly sunshine duration and solar radiation fields were generated using the best performance combination.

The obtained results allow for improvements to be made upon these estimations in the future. This study makes up an important resource for the development of photovoltaic generation projects in Colombia as well as to nurture the general public awareness of the behavior of this variable.

Keywords:

Sunshine duration, solar radiation, interpolation techniques, Angström-Prescott model

INTRODUCCIÓN

El presente estudio pretende evaluar diversas metodologías de interpolación de radiación solar en Colombia e identificar aquella que presente el mejor desempeño, mediante la generación de campos de brillo solar y la aplicación de un modelo que convierta datos de brillo solar en irradiación. El brillo solar se define como la cantidad de tiempo durante el cual incide luz solar directa sobre algún lugar. La irradiación, por su parte, se define como la cantidad de energía solar incidente en una superficie por unidad de área durante un tiempo determinado.

Para lograr este objetivo, el documento se divide en varios capítulos que fueron desarrollados cronológicamente. En el primero de ellos, se presenta el problema de investigación y los objetivos propuestos para darle solución a ese problema. Se exponen, además, las investigaciones pasadas en relación con el tema central y las teorías, definiciones y modelos que le dan el fundamento técnico al estudio.

En el segundo capítulo, se presenta el esquema metodológico propuesto, que consta de cinco objetivos específicos, que en conjunto logran alcanzar el objetivo general de evaluar diferentes metodologías de interpolación de radiación solar en Colombia. Posteriormente, se incluye un capítulo en el cual se presenta la información recolectada de diversas fuentes de información, necesaria para desarrollar la investigación.

El siguiente capítulo desarrolla los dos primeros objetivos, relacionados con la selección de las metodologías de interpolación a evaluar y el procesamiento de la información recolectada. Por último, el quinto capítulo presenta los resultados generados a partir de la ejecución de las interpolaciones, del modelo y del análisis comparativo entre las metodologías en donde se selecciona aquella que mejores resultados presente. En este capítulo, se entrega como producto final los mapas de brillo solar e irradiación a una escala anual.

Finalmente, se incluye un capítulo con el desarrollo de un trabajo adicional que no fue propuesto en el esquema metodológico inicial, el cual entregó como producto los mapas de brillo solar e irradiación para Colombia a escala mensual, contruidos con la metodología de interpolación seleccionada.

1 PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la crisis energética que afrontó Colombia entre los años 1992 y 1993, el país experimentó un racionamiento de energía eléctrica a causa del fenómeno de El Niño, que golpeó fuertemente el entonces sector eléctrico colombiano (Mateus, 2016). Tras este evento, se ha venido desarrollado un marco normativo que implementa una serie de regulaciones en el sistema energético nacional. Una de ellas es la Ley 1715 de 2014, la cual establece una política pública para la integración de las energías provenientes de fuentes no convencionales, principalmente aquellas de carácter renovable, al sistema energético del país. Una de sus finalidades es promover la autogeneración de energía a pequeña y gran escala en Colombia (Congreso de Colombia, 2014). En ambas, se produce la generación de energía eléctrica para atender sus propias necesidades, y aparece el concepto de *prosumidor*, que indica la condición simultánea de producir y consumir la energía producida.

Una de las fuentes de generación de energía de especial atención e interés nacional es la energía solar. Colombia, al tener una ubicación geográfica favorecedora en el trópico, posee algunas zonas que tienen un muy alto potencial solar, debido a que cuentan con radiación solar constante durante todo el año. Lo anterior, sumado al fomento de la inversión, investigación y desarrollo de este tipo de tecnologías por parte del Gobierno (Congreso de Colombia, 2014), permite que el país tenga un gran potencial de generación de esta fuente de energía, y con el paso del tiempo, que se vayan desarrollando proyectos solares a pequeña y gran escala.

No obstante, para realizar un proyecto de generación de energía solar, tanto para convertirse en un *prosumidor* de energía eléctrica como en un gran generador, es importante contar con información de radiación solar que alcance niveles horarios, con el fin de caracterizar el recurso solar en la zona de interés y determinar la capacidad solar que se podrá instalar. En el año 2016, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), mediante la Resolución 243, estableció que para asegurar la confiabilidad en el suministro de energía a largo plazo en el país, las plantas solares despachadas centralmente deberán contar con series históricas de irradiación horizontal y de temperatura ambiente con registros horarios iguales o mayores a diez años (CREG, 2016).

Lo anterior, hace necesario que se tenga conocimiento acerca de la disponibilidad de la energía solar en Colombia. Es por esto, que el IDEAM desarrolló el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, que es una herramienta importante en la evaluación de la disponibilidad de la radiación global y del brillo solar en el territorio nacional (Benavides-Balleteros, Simbaqueva-Fonseca, & Zapata-Lesmes, 2017). Para su elaboración, se validó la información medida por sensores de radiación de estaciones del IDEAM y de otras entidades con redes regionales pequeñas, se realizó una modelación que convierte datos de brillo solar en radiación global, y se generaron mapas mensuales y multianuales, entre los que se encuentran los de irradiación global horizontal y brillo solar, mediante la interpolación de los datos evaluados y validados. El método de interpolación usado por el IDEAM corresponde a IDW (Benavides-Balleteros et al., 2017).

Una de las herramientas utilizadas a nivel mundial para la obtención de datos de radiación solar es Solargis, que hace uso de algoritmos, los cuales ofrecen series históricas y actualizaciones de algunos parámetros del recurso solar a partir de información secundaria proveniente de satélites geoestacionarios, bases de datos atmosféricas y meteorológicas y un modelo digital de terreno. Esta herramienta hace uso de un modelo de cielo despejado del cual se obtiene la irradiancia de cielo despejado, que junto con el índice de nubes obtenido a partir de un modelo que cuantifica el efecto de atenuación de las nubes, cuantifica la irradiancia normal directa y la irradiancia horizontal global. Posteriormente, se calculan la irradiancia difusa y y/o la irradiancia corregida para tener en cuenta los efectos de sombreado del terreno u objetos circundantes (Solargis, 2016). Sin embargo, esta herramienta posee algunas limitaciones relacionadas con la exactitud en sus estimaciones. Una de ellas tiene relación con las zonas de alta incertidumbre, que son principalmente: latitudes altas, países con clima húmedo tropical, montañas altas, zonas con un nivel alto y cambiante de aerosoles, y superficies desérticas reflectivas. Esto hace que, para las estimaciones horarias y mensuales, el porcentaje de incertidumbre de los sensores de irradiancia normal directa pueda ser considerablemente alto (Suri & Cebecauer, 2012). Otro punto importante es que la validación de la información obtenida se realizó mediante la comparación con mediciones en tierra en más de 200 sitios que incluían todo tipo de climas; sin embargo, ninguna estación de medición se localizó en Colombia (Solargis, 2016).

En una investigación realizada por Jeong, St-Hilaire, Gratton, Bélanger, y Saad (2017), se compararon algunos métodos de interpolación geoestadística para la estimación de la radiación solar global en una superficie horizontal. Se concluyó que la interpolación arrojada por OK presentaba mejores resultados que la interpolación IDW, con un coeficiente de determinación mayor y con errores más bajos. Otra investigación llevada a cabo por Crespo et al., (2014), evaluó el mejor método de interpolación que permitiera reemplazar los datos faltantes de irradiancia solar global en una superficie plana por los valores estimados. Se obtuvieron muy buenos resultados con el método de imputación múltiple por ecuaciones encadenadas (MICE) en comparación con los otros métodos utilizados, entre los que se encontraba el IDW.

Si bien el método IDW es una buena aproximación para determinar los valores de radiación solar en el territorio nacional, no es el método que genere los mejores resultados y que arroje la representación más cercana a la realidad. El principal problema que presenta la interpolación IDW, es que frecuentemente genera los llamados “ojos de buey”, que son patrones circulares que indican claramente la posición de los puntos muestreados. Además de esto, el peso que se le asigna a los puntos a interpolar depende de la distancia entre ellos y los puntos muestreados (Böhner & Bechtel, 2017); es decir, que el método asume que el comportamiento espacial de las variables es únicamente dependiente de la distancia, lo cual no es necesariamente cierto.

Lo anterior hace indispensable que el país cuente con información de radiación solar levantada a partir de métodos de interpolación más sofisticados, que se nutran de información primaria y secundaria. Se requiere además que los datos arrojados sean validados con información primaria obtenida de estaciones meteorológicas en el territorio nacional, con el fin de asegurar una estimación más precisa de los parámetros solares que permita tener una mayor calidad en la información. Esto podría permitir abrir las puertas a nuevos proyectos de generación de energía solar y garantizar la confiabilidad en el suministro de energía eléctrica por medio de esta fuente. Por lo anterior cabe preguntarse,

¿qué metodología de interpolación geoespacial generará los mejores resultados en Colombia?

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo general

Evaluar metodologías de interpolación de radiación solar en Colombia

1.2.2 Objetivos específicos

Seleccionar las metodologías de interpolación a usar.

Procesar información primaria y secundaria de radiación solar y de variables externas.

Elaborar las interpolaciones para obtener mapas de brillo solar.

Aplicar un modelo existente que permita convertir datos de brillo solar en irradiación.

Realizar un análisis comparativo de las metodologías de interpolación para escoger aquella que presente los mejores resultados.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Antecedentes

Una investigación realizada por Sen & Sahin (2001) en Turquía, tenía como objetivo encontrar un procedimiento regional para estimar el valor de la irradiación solar en cualquier punto en donde existieran mediciones de irradiación solar global. Se aplicó un enfoque de variograma acumulativo, que buscaba encontrar el cambio de la variabilidad espacial con la distancia de un conjunto dado de datos de irradiación solar. La validez de la metodología se comprueba primero con la técnica de validación cruzada antes de su aplicación a sitios sin registros de irradiación solar. Después, cada sitio tendrá cierto número de sitios adyacentes más cercanos para la interpolación espacial. Se ha demostrado que el procedimiento presentado en el trabajo de Sen & Sahin es mejor que las técnicas clásicas como IDW.

En una región de Nueva Zelanda, Tait & Ben (2009) llevaron a cabo un estudio en el cual se describe un método de interpolación de radiación solar global diaria estimada por medio de estaciones climáticas distribuidas por todo el país, usando el modelo TPS. Se usaron datos medidos por sensores de radiación y brillo solar, convirtiendo los últimos a radiación solar utilizando el modelo Ångström, con el fin de aumentar el número de estaciones para aplicar la interpolación. Adicionalmente, utilizaron fuentes de información bivariada o trivariada, entre las cuales se encontraban los datos satelitales del Advanced Very High Resolution Radiometer - AVHRR, que poseen un estimado de la cobertura de las nubes, obteniendo así el menor error al calcular los campos de radiación. Los campos mensuales

y diarios generados se utilizaron en conjunto con otras variables para alimentar un modelo de crecimiento de pasto en la región.

Por otra parte, Crespo Turrado et al. (2014), midieron la irradiancia solar global en una superficie plana mediante una red de estaciones meteorológicas ubicadas en Galicia, España. Sin embargo, la falta de datos o la existencia de datos erróneos hizo necesaria la imputación multivariada de datos por medio de la interpolación IDW, el método de imputación múltiple por ecuaciones encadenadas (MICE, por sus siglas en inglés) y la regresión lineal múltiple (MLR, por sus siglas en inglés). Los mejores resultados se obtuvieron con el método MICE en comparación con los otros métodos.

En otra investigación realizada por Jeong et al. (2017), se compararon métodos de interpolación geo-estadística y modelos de simulación estocástica para la estimación de la radiación solar diaria global en una superficie horizontal, con el objetivo de llenar datos vacíos en una región en el sur de Quebec, Canadá. Se compararon 3 métodos de interpolación: IDW, Vecino Más Cercano (NN, por sus siglas en inglés) y OK, y 3 modelos de simulación estocástica que se desarrollaron usando Redes Neuronales Artificiales (ANN, por sus siglas en inglés). Las metodologías geoestadísticas presentaron una mejor representación espacial que los modelos de simulación en las regiones donde se contaba con una alta densidad de estaciones. Adicionalmente, los resultados muestran que, entre las metodologías geoestadísticas utilizadas, el OK es el que tiene el mejor desempeño, seguido por IDW.

En adición, Rodríguez, Díez, González, Pérez & Alonso (2017) realizaron un estudio similar al presentado por Jeong et al. (2017); no obstante, se compararon 4 métodos de interpolación: IDW, splines, NN y OK. Los resultados arrojaron que OK era el mejor método de interpolación comparado con los otros, al obtener los errores más bajos.

El Atlas de Radiación Solar interactivo generado por el Benavides-Balleteros, Simbaqueva-Fonseca, & Zapata-Lesmes (2017) con información de brillo solar y radiación solar medidas en tierra, utilizó el método IDW para interpolar los valores de radiación y brillo solar en el territorio colombiano. Debido a que únicamente las estaciones automáticas poseen información de radiación solar, se aplicó el modelo Ångström-Prescott para calcular radiación solar a partir de la información de brillo solar. No obstante, para poder utilizar el modelo fue necesario calibrar varios de sus parámetros, utilizando estaciones representativas por región que tuvieran las dos variables. La metodología utilizada por estos autores y sus resultados, se presentarán como punto de partida para el presente estudio.

En Colombia, Álvarez Villa (2007) estimó campos mensuales de radiación neta para cuantificar la incertidumbre asociada con la estimación del caudal medio anual mediante el modelo de balance hídrico de largo plazo, usando la metodología kriging con deriva externa (KED, por sus siglas en inglés).

Adicionalmente, Cepeda (2016) realizó un modelamiento del brillo solar a lo largo de un periodo de tiempo continuo de 5 años, con información proporcionada por estaciones meteorológicas del IDEAM distribuidas en todo el Departamento del Valle del Cauca. Para determinar el comportamiento de la variable, se usó la técnica de interpolación lineal geoestadística Kriging mediante el software ArcGIS. Se desarrollaron 30 modelos en total:

5 para cada año desde el 2006 hasta el 2011, y se establecieron los mejores ajustes que fueron presentados mediante mapas anuales del número de horas de brillo solar.

En síntesis, los estudios mencionados demuestran que se ha realizado una búsqueda de metodologías adecuadas para la interpolación de parámetros solares, tanto internacionalmente como dentro del país. Se ha demostrado que existen otros métodos de interpolación aplicados a radiación solar que han presentado mejores resultados que el método IDW usado por el IDEAM. Es importante entonces evaluar otras metodologías de interpolación que puedan generar mejores resultados al ser aplicadas en un territorio climática y geográficamente complejo.

1.3.2 Marco teórico

El marco teórico de este estudio está conformado por el desarrollo de los marcos institucional y regulatorio, concernientes al sector eléctrico y a la generación de información climática y meteorológica en Colombia; también, por una descripción acotada de algunos parámetros solares de interés; y finalmente, por la descripción de un modelo y de las metodologías de interpolación más ampliamente usadas en el mundo en aplicaciones climáticas.

1.3.2.1 Marco institucional

Aquí se pretende abarcar una descripción breve de la principal institución encargada de la generación y el manejo de información solar en el país, y de las principales entidades que llevan a cabo la regulación y la planeación del sector eléctrico colombiano.

1.3.2.1.1 IDEAM

El IDEAM es una institución pública creada en 1993, de apoyo técnico y científico a el Sistema Nacional Ambiental, que genera información sobre el estado y las dinámicas de los recursos naturales y del medio ambiente, con el fin de apoyar la gestión ambiental, el ordenamiento territorial y la conservación de ecosistemas. Dentro de sus funciones se destacan la recopilación y el manejo de la información científica, hidrológica, meteorológica y todo lo relacionado con el medio ambiente en Colombia, y la administración del funcionamiento y ubicación de sus bases meteorológicas en el territorio nacional (IDEAM, s.f.).

1.3.2.1.2 Entidades vinculadas al sector energético

En el año 1992, el Gobierno Nacional reestructuró el Ministerio de Minas y Energía -la principal institución del sector energético de Colombia-, y creó tres unidades administrativas especiales: la Comisión de Regulación de Energía - CREG, la Unidad de Información Minero Energética - UIME y la Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME. La CREG se encarga de regular el mercado energético, definir estructuras de tarifas para consumidores y garantizar el libre acceso a la red. La UPME tiene dentro de sus funciones establecer los requerimientos energéticos del país con base en proyecciones de demanda que tomen en cuenta la evolución esperada de las variables demográficas y económicas y de precios de los recursos energéticos, y elaborar el Plan Energético Nacional y el Plan de Expansión del Sector Eléctrico (Grupo Energía de Bogotá, 2017).

1.3.2.2 Marco regulatorio

El marco regulatorio del sector eléctrico colombiano desagrupa las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía. Está encabezado por las Leyes 142 y 143 de 1994, que corresponden a la norma de nivel nacional de servicios públicos domiciliarios y a la norma de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, respectivamente.

Dadas las funciones institucionales establecidas por la Ley 143 la CREG (2016), mediante la Resolución 243 de 2016, definió la metodología para determinar la energía firme para el Cargo por Confiabilidad (ENFICC) de plantas solares fotovoltaicas. En ella, se establece que para el cálculo de la ENFICC de plantas despachadas centralmente que producen energía eléctrica con paneles fotovoltaicos, se deberá contar con información de irradiación horizontal y temperatura ambiente en series históricas con registros horarios de tiempo igual o mayor a diez años.

La Resolución 111 de 2017, que realizó ajustes a la Resolución 643, afirma que *“en caso de que el agente no cuente con las series o con los datos suficientes de estas en el sitio de la planta para cumplir lo dispuesto en el artículo 1 de esta resolución, el dictamen técnico deberá dar concepto de la estimación de estas series partiendo de fuentes secundarias reconocidas internacionalmente y/o de otros puntos de medición conocidas de series de irradiación horizontal y temperatura ambiente históricas para cada hora en el sitio de la planta”* (CREG, 2017).

1.3.2.3 Parámetros solares

1.3.2.3.1 Radiación solar

El concepto de radiación solar incluye algunos términos que pueden presentar confusiones. Aquí se aclaran algunas de estas definiciones.

La radiación solar global representa toda la radiación que llega a la tierra y que es medida sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180°, obtenido a partir de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa. El aporte de cada componente a la radiación global varía con la altura del Sol, la reflexión de la superficie, la transparencia de la atmósfera, la cobertura de nubes y la latitud de localización (IDEAM, 2015).

La irradiación es la cantidad de radiación solar incidente en una superficie por unidad de área durante un tiempo determinado. Se expresa en unidades de energía por unidad de área, comúnmente se encuentra en Wh/m^2 o kWh/m^2 (Guevara-Vásquez, 2003). Para efectos de simplificación, el término ‘radiación solar’ es comúnmente usado para referirse a ‘irradiación’, expresando la cantidad de energía del solar que llega a una superficie.

La irradiancia, por otra parte, es la magnitud representada por el cociente entre la potencia y el área que recibe la radiación solar; es decir, la tasa a la cual la radiación solar incide sobre una superficie por unidad de área (Guevara-Vásquez, 2003), y se expresa en W/m^2 .

1.3.2.3.2 Brillo solar

La duración del brillo solar o heliofanía en horas, representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer (IDEAM, 2015).

1.3.2.4 Modelo Ångström-Prescott

En algunas ocasiones, medir directamente la radiación solar global en un lugar determinado representa tal dificultad operacional, que se hace inviable. Por consiguiente, se han desarrollado modelos que permiten determinar la radiación solar indirectamente, a través de estimaciones que generalmente hacen uso de la variable ‘horas de brillo solar’. Uno de estos modelos es el Ångström-Prescott (Prescott, 1940), desarrollado por Ångström y modificado por Prescott, el cual ha sido ampliamente usado para estimar valores de radiación solar a partir de información de brillo solar en estudios como los realizados por Zou et al. (2016), Javier Almorox (2011), Robaa (2009) y J. Almorox, Benito, & Hontoria (2005). En términos generales, el modelo define una relación entre la energía solar disponible en el suelo y la duración de brillo solar (J. Almorox, Benito, & Hontoria, 2005), según la ecuación:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{n}{N} \right), \quad (1)$$

en donde H es la radiación global y H_0 la radiación solar extraterrestre en una superficie horizontal, expresadas en megajulios por metro cuadrado por día ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$), n es el número de horas medidas, N es la máxima duración diaria de brillo solar, y a y b son constantes empíricas (J. Almorox et al., 2005).

1.3.2.5 Métodos de interpolación

1.3.2.5.1 Métodos de interpolación geoestadísticos

Son métodos ampliamente usados en la literatura que se derivan de la forma genérica de Kriging. Están basados en la suposición de que todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas más cercanas están más relacionadas entre sí que aquellas más distantes. En contraste con IDW, las ponderaciones de las variables no están solo determinadas por las distancias entre los puntos de muestreo y las ubicaciones de destino, sino también por una correlación funcional de la variabilidad y las distancias entre los puntos de muestreo. La consideración de una autocorrelación espacial sólo es significativa si la variable a interpolar muestra una relación con el vecindario o una dependencia espacio-estadística con los puntos vecinos (Böhner & Bechtel, 2017).

La característica general de los métodos geoestadísticos es la regionalización de las variables. Para lograr esto se realiza una división, en dos componentes, de la variación espacial de la variable de interés $Z(x)$ en una ubicación x : un componente determinístico $\mu(x)$, que representa el cambio gradual a lo largo de la zona de estudio, y uno estocástico $R(x)$, que genera aleatoriedad a la función (Lloyd, 2010), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Z(x) = \mu(x) + R(x) . \quad (2)$$

La fórmula general para el grupo de metodologías Kriging se presenta en la (3), en donde la predicción $\hat{Z}(x_0)$ en la ubicación x_0 se define como la suma del valor medido $Z(x_i)$ en la ubicación x_i por el peso desconocido λ_i , que depende de la distancia entre la ubicación x_i del valor medido y la ubicación x_0 del valor a predecir, y de la disposición espacial general de los puntos medidos (Lloyd, 2010).

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) . \quad (3)$$

1.3.2.5.1.1 Variograma

El variograma (o semivariograma) analiza la variabilidad de los datos a partir de la lejanía entre ellos y de su dirección. Los pesos desconocidos λ_i se obtienen a partir de los coeficientes de un modelo que se ajusta al variograma (Lloyd, 2010). La Figura 1 muestra los elementos principales del variograma, que incluyen la meseta, meseta parcial, alcance y efecto pepita.

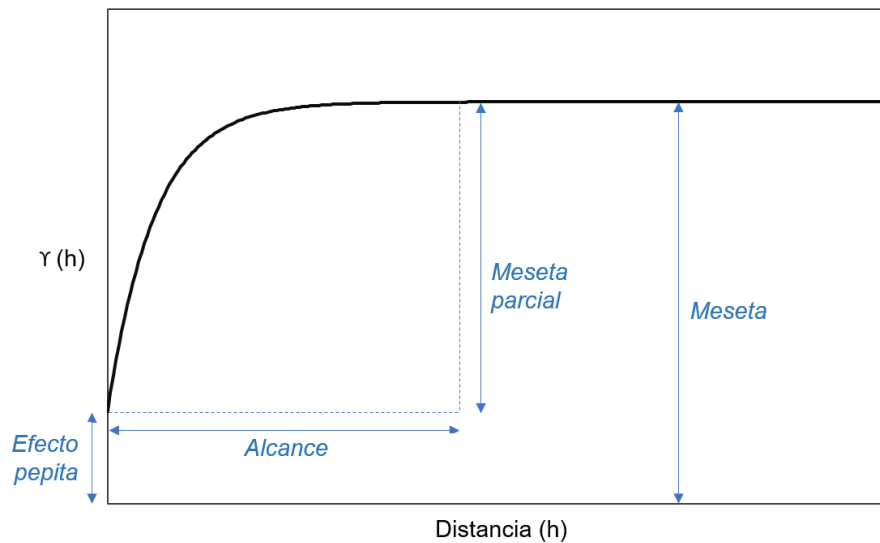


Figura 1. Descripción gráfica de un variograma típico.

El tipo de modelo influencia la predicción de los valores desconocidos, particularmente cuando la forma de la curva cerca al origen difiere significativamente; entre más empinada sea la curva cerca al origen, mayor influencia tendrán los vecinos más cercanos en la predicción (ESRI, 2017a). La Figura 2 muestra las curvas de ajuste de algunos de estos modelos.

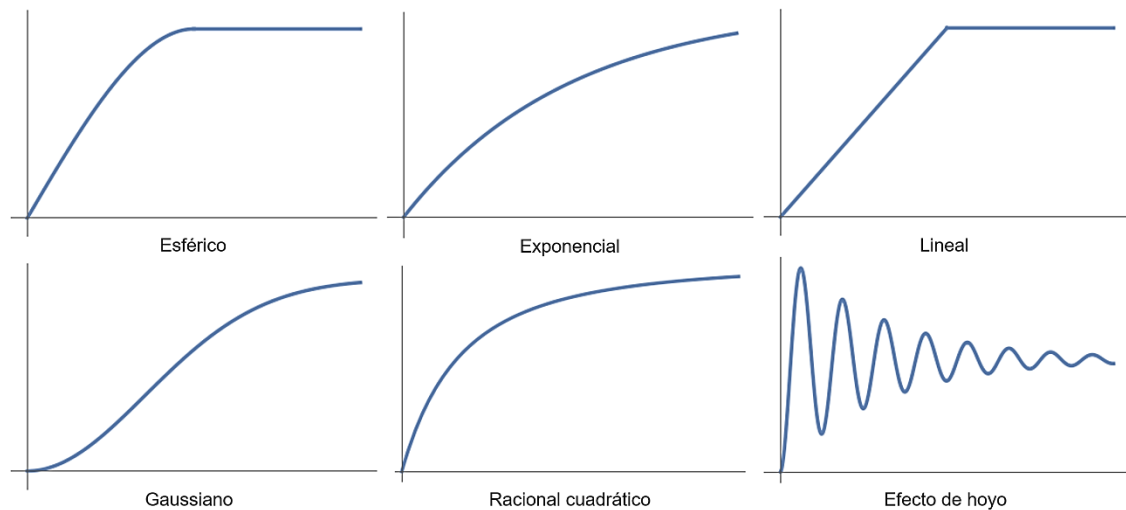


Figura 2. Curva de ajuste de algunos tipos de modelo al variograma.

1.3.2.5.1.2 *Kriging Ordinario (OK)*

Esta técnica de interpolación funciona bajo la hipótesis de que la media de la variable a interpolar no tiene que ser conocida y, en un sentido estricto, no tiene que ser espacialmente invariante, sino que se asume constante a lo largo del vecindario de estudio (Böhner & Bechtel, 2017).

1.3.2.5.1.3 *Kriging Universal (UK)*

Kriging universal considera que la media es una función que varía suavemente en todo el dominio. Kriging con deriva externa (KED) es un caso particular del sistema de ecuaciones de UK, ya que considera que la tendencia de la variable de estudio la aporta una función de tendencia de una variable secundaria que varía continuamente con el espacio, y que esté relacionada de forma lineal con la media de la variable de estudio (Álvarez Villa, 2007).

1.3.2.5.2 *Métodos de interpolación determinística*

A diferencia de los métodos de interpolación geoestadísticos basados en modelos que incluyen las relaciones estadísticas entre los puntos muestreados, las herramientas de interpolación determinísticas están basadas directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante (ESRI, 2017a).

1.3.2.5.2.1 *Ponderación por el inverso de la distancia (IDW)*

Es un método computacional que permite el cálculo de conjuntos de datos en cuadrículas de alta resolución a partir de altos volúmenes de datos provenientes de fuentes puntuales distribuidos irregularmente. Para aplicaciones climáticas, el IDW también es un método muy utilizado si los datos de entrada se derivan de una red de observación densa. Como se describió en secciones pasadas, la interpolación IDW considera el recíproco de las

distancias euclidianas entre los puntos de datos y los nodos de una cuadrícula de destino como ponderaciones, al determinar su valor como la media aritmética ponderada de los valores muestreados (Böhner & Bechtel, 2017); es decir, que la variable que se representa espacialmente disminuye su influencia mientras tenga una distancia mayor a los puntos muestreados (ESRI, 2017b).

La (4 define el valor predicho $\hat{Z}(x_0)$ en una ubicación x_0 , en función del número de observaciones n en un vecindario, y del peso asignado a cada observación $z(x_i)$ en la ubicación x_i , calculado como el inverso de la distancia d_{i0} entre la ubicación del valor a predecir y del punto muestreado elevado a una potencia p (Lloyd, 2010).

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-p}} . \quad (4)$$

La potencia p mide la influencia de los valores medidos sobre los valores interpolados; cuanto más grande sea su valor, sólo los puntos inmediatamente alrededor de los puntos medidos se verán influenciados por ellos, lo que generará que la superficie de interpolación esté menos suavizada (ESRI, 2017b). La Figura 3 muestra el comportamiento del peso y la distancia con diferentes valores de potencia p .

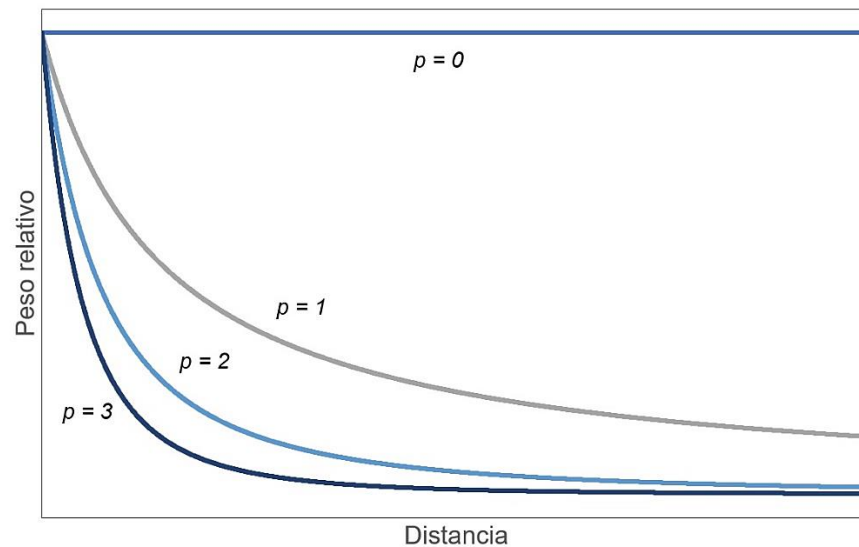


Figura 3. Comportamiento del peso relativo y la distancia para diferentes valores de la potencia p (Lloyd, 2010).

1.3.2.5.2.2 Splines

Es el nombre genérico que reciben los métodos que emplean funciones matemáticas diseñadas para minimizar la curvatura de una superficie interpolada al estimar los valores espaciales a partir de datos de entrada dispersos, generando procesos lisos. Posee diferentes métodos, siendo la interpolación TSP la más comúnmente implementada en sistemas de información georeferenciada (Böhner & Bechtel, 2017).

Los métodos de interpolación de TPS generan valores estimados representados en cuadrículas, para que la superficie continua sea lo más lisa posible, conservando con exactitud los valores de entrada en cada punto. En términos generales, la función TPS posee dos componentes: una función espacial de tendencia y una función de ponderación básica (Böhner & Bechtel, 2017).

2 METODOLOGÍA

La metodología del presente estudio está dividida en 4 fases principales, que se dividen a su vez en actividades necesarias para alcanzar los 4 objetivos específicos, y en conjunto, lograr el objetivo general. El siguiente esquema representa el diseño metodológico propuesto:



Esquema 1. Esquema metodológico para el desarrollo de este estudio, dividido por los objetivos específicos planteados con sus respectivas actividades.

2.1 FASE 1: SELECCIÓN DE METODOLOGÍAS DE INTERPOLACIÓN

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos relevantes publicados en los últimos 10 años, en los cuales se haya aplicado al menos una metodología de interpolación para la generación de datos faltantes o campos interpolados de variables climáticas. Posteriormente, se identificaron las cuatro metodologías que han sido las más usadas y que han generado buenos resultados en estos estudios pasados.

2.2 FASE 2: PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA DE RADIACIÓN SOLAR Y DE VARIABLES EXTERNAS

2.2.1 Definición de variables externas

Algunas metodologías de interpolación como UK poseen un carácter multivariado, lo que indica que hacen uso tanto de una variable de estudio como de otras variables que estén correlacionadas con la primera. Así, se definieron algunas variables complementarias que aseguran una correlación con la radiación solar incidente dentro de la zona de estudio.

2.2.2 Recolección de información

Como un primer paso dentro del procesamiento de la información, se realizó una recolección de información primaria, que incluyó datos de brillo solar e irradiación medidos en tierra por las redes meteorológicas del IDEAM instaladas en Colombia, y entregados a una resolución temporal diaria y horaria, respectivamente. Adicionalmente, se recolectó información secundaria derivada de satélites de las variables externas definidas, generada por agencias internacionales dedicadas a la investigación climática y atmosférica.

2.2.3 Tratamiento de la información

A la información primaria de brillo solar recolectada se le realizó un tratamiento en el cual se mantuvieron los registros de aquellos meses que tenían como mínimo el 70% de sus días registrados. Luego de realizar esta depuración, se agregó la información diaria para cada estación en promedios mensuales de horas de luz solar diaria para cada uno de los meses y en un promedio anual multianual según el periodo de registro de la estación. Posteriormente, para cada una de las estaciones se escogieron las que tuvieran un periodo de registro no menor a 10 años en cualquier temporada durante su registro, y aquellas con un máximo de 3 valores mensuales faltantes [de brillo solar. Finalmente, fueron seleccionadas unas estaciones de brillo solar para ser usadas en este estudio, después de eliminar algunas que no cumplieron los criterios de selección mencionados.

A la información proveniente de las estaciones de irradiación se le aplicó un tratamiento similar al realizado a los datos de brillo solar: los valores horarios se agregaron en promedios mensuales y anuales de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$), y se seleccionaron unas estaciones que correspondían a aquellas con un máximo de 9 valores mensuales faltantes y con un periodo de registro mínimo de 3 años, que fueron aquellas escogidas para el desarrollo de este estudio.

2.2.4 Delimitación regional

Se estudió la zonificación hidrográfica existente adoptada por el IDEAM, que divide al país por regiones delimitadas por sus principales cuencas hidrográficas, con el objetivo de caracterizar el comportamiento climático de cada una de ellas mediante inferencias de algunas variables climáticas basadas en datos de brillo solar. De acuerdo con este análisis, se decidió adoptar una nueva zonificación que será expuesta más adelante.

2.3 FASE 3: ELABORACIÓN DE LAS INTERPOLACIONES

2.3.1 Determinación de software

Las interpolaciones se ejecutaron mediante el conjunto de productos ArcGIS, que incluye softwares usados en el campo de los Sistemas de Información Geográfica. El software ArcMap incluye una extensión para realizar análisis geoestadísticos llamada *Geostatistical Wizard*, en la cual se encuentran metodologías determinísticas, geoestadísticas y de interpolación con barreras.

2.3.2 Definición de parámetros

Como paso previo a la ejecución de las interpolaciones, se generaron diferentes combinaciones en las que se variaban algunos parámetros asociados a cada metodología de interpolación seleccionada. Estos parámetros presentan especial influencia sobre los resultados generados en las interpolaciones, y se variaron teniendo en cuenta el alcance del estudio y las características geoespaciales de las variables de estudio.

2.3.3 Validación de resultados

En este paso, los campos interpolados de brillo solar generados por las diferentes combinaciones de parámetros se validaron con información primaria; es decir, con información medida a través de estaciones en tierra como una forma de comparar los desempeños entre las diferentes metodologías y de cada uno de los parámetros dentro de una misma metodología. Es importante mencionar que la ejecución de las interpolaciones tuvo que ser realizada simultáneamente con la validación de los resultados, con el fin de escoger y variar algunos parámetros dentro de las interpolaciones.

Para realizar esta validación, se seleccionaron algunas estaciones de manera aleatoria entre el total estaciones de brillo solar, a las que se les denominó conjunto de validación; las estaciones restantes se separaron en otro conjunto llamado prueba. Este paso se repitió dos veces más, con el objetivo de tener tres conjuntos de datos de prueba y tres conjuntos de datos de validación. Los conjuntos de prueba se usaron para ejecutar las interpolaciones con las diferentes combinaciones de parámetros, y los conjuntos de validación, por otra parte, se utilizaron como información de validación para evaluar el desempeño de los parámetros dentro de una misma metodología de interpolación y para realizar un análisis comparativo entre las metodologías aplicadas.

Al realizar las interpolaciones con los tres conjuntos de prueba para cada combinación de parámetros, se dio paso a la validación de los resultados con los tres conjuntos de validación. Usando la herramienta *Validation/Prediction* de ArcMap, se extrajeron los valores de brillo solar en horas por día (h/día) de la superficie interpolada en las ubicaciones de las estaciones de validación. A partir de los valores reales (medidos en tierra) y predichos (interpolados), se calcularon algunos estadísticos comúnmente usados para evaluar el desempeño de las metodologías de interpolación en aplicaciones climáticas (Marzo et al., 2017; Javier Almorox, 2011; J. Almorox, Benito, & Hontoria, 2008 & J. Almorox et al., 2005): error medio aritmético (MBE, por sus siglas en inglés), error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y error medio aritmético estandarizado (MBES, por sus siglas en inglés). Sus respectivas ecuaciones se presentan a continuación:

$$MBE = \frac{1}{N_x} \sum_i^{N_x} x_i, \quad (5)$$

$$MBES = \frac{\sum_i^{N_x} x_i}{\sum_i^{N_x} R_i} * 100\%, \quad (6)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N_x} \sum_i^{N_x} x_i^2 \right)^{0,5}, \quad (7)$$

donde i es contador para cada estación, N_x el número total de estaciones de cada conjunto de validación, R_i el valor real (medido en tierra) y x_i el valor residual calculado como la diferencia entre el valor predicho y R_i .

2.3.4 Ejecución de las interpolaciones

Con los estadísticos calculados se seleccionaron, dentro de cada metodología, las combinaciones de parámetros con los menores valores en los errores MBE, RMSE y MBES. Para estas combinaciones de parámetros seleccionadas, se realizaron nuevamente las interpolaciones, usando esta vez la información anual multianual de brillo solar para el total de las estaciones seleccionadas en el Tratamiento de la información. La información anual multianual de brillo solar se usó como la única variable de entrada en las metodologías IDW, TPS y OK, y como información primaria para UK. Adicionalmente, se usó la información satelital adquirida como información secundaria para las interpolaciones con UK. De esta manera, se obtuvieron mapas anuales de brillo solar en horas por día (h/día) para las combinaciones seleccionadas de IDW, TPS, OK y UK, a una resolución espacial de cuadrículas de 10 km x 10 km.

2.4 FASE 4: APLICACIÓN DE MODELO DE CONVERSIÓN DE BRILLO SOLAR A IRRADIACIÓN

2.4.1 Cálculo de parámetros

Se aplicó el modelo Ångström-Prescott (Prescott, 1940) para convertir información de brillo solar en irradiación expresada MJ/m²/día. Además de la (1), se incluyen las siguientes ecuaciones para el cálculo de diferentes parámetros solares y terrestres (J. Almorox, Benito, & Hontoria, 2005):

$$H_0 = \left(\frac{1}{\pi} \right) I_{CS} E_0 \left[\cos \lambda \cos \delta \sin W_S + \left(\frac{\pi}{180} \right) \sin \lambda \sin \delta W_S \right], \quad (8)$$

donde H_0 es la radiación extraterrestre en una superficie horizontal expresada en MJ/m²/día, I_{CS} es la constante solar equivalente a 118,108 MJ/m²/día, λ es la latitud del sitio, E_0 es el

factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, δ es la declinación solar y W_s es el ángulo horario.

La declinación solar δ , expresada en grados, se obtiene a partir de la ecuación:

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) (0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma), \quad (9)$$

donde el ángulo diario Γ , expresado en radianes, se calcula según:

$$\Gamma = 2\pi \frac{(n_{\text{día}} - 1)}{365}, \quad (10)$$

donde $n_{\text{días}}$ es el número de día del año.

El factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre E_0 se cuantifica, por su parte, a partir de la ecuación:

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma. \quad (11)$$

El ángulo horario W_s , expresado en radianes, se calcula según:

$$W_s = \cos^{-1} \left(\frac{-\sin \lambda \sin \delta}{\cos \lambda \cos \delta} \right). \quad (12)$$

La duración del día en horas o el tiempo entre el amanecer y el atardecer N se calcula con la expresión:

$$N = \frac{W_s}{7,5}. \quad (13)$$

Con la información de estaciones que tuvieran registros diarios tanto diarios de brillo solar como de irradiación, se calcularon Γ , δ , E_0 , W_s , H_0 y N . Con la relación entre H/H_0 y n/N , se construyeron regresiones lineales para las diferentes regiones climáticas. La ecuación de la línea de tendencia se usó para encontrar los constantes a y b de la ecuación general del modelo Ångström-Prescott presentada en la (1).

2.4.2 Generación de mapas de irradiación

Luego de tener las constantes, se aplicó la ecuación del modelo usando como información de entrada los mapas anuales de brillo solar para las combinaciones de *parámetros* seleccionadas, los mapas anuales de H_0 y N , y los valores de a y b . Como resultado, se generaron mapas anuales de irradiación expresada en kWh/m²/día para cada una de las combinaciones seleccionadas por IDW, TPS, OK y UK.

2.4.3 Validación de resultados

La validación de los mapas generados se realizó extrayendo los valores interpolados de irradiación promedio anual en las ubicaciones del conjunto de datos de las estaciones de irradiación, que fueron seleccionadas mediante la depuración descrita en el Tratamiento de la información. Estos valores se compararon con los valores medidos en tierra usando los estadísticos MBE, RMSE y MBES.

2.5 FASE 5: ANÁLISIS COMPARATIVO

2.5.1 Análisis de estadísticos

Con los estadísticos calculados en las etapas de validación de los resultados de los campos anuales de brillo solar e irradiación generados en la Fase 3: Elaboración de las interpolaciones y Fase 4: Aplicación de modelo de conversión de brillo solar a irradiación, respectivamente, se realizó un análisis comparativo con el objetivo de obtener conclusiones sobre los desempeños de las diferentes metodologías de interpolación y de sus parámetros asociados.

2.5.2 Análisis de mapas de radiación

En este paso se realizaron comparaciones cualitativas entre los productos entregados por las interpolaciones y su respectiva conversión a irradiación. Se verificó que los mapas de radiación solar obtenidos y validados representaran el comportamiento esperado de la radiación solar en el territorio nacional, y que los campos de radiación presentaran la menor cantidad de áreas o puntos inconsistentes.

2.5.3 Elección de la mejor metodología

Finalmente, a partir de las conclusiones obtenidas con las comparaciones de las metodologías aplicadas mediante los estadísticos calculados y los mapas de radiación solar obtenidos, se seleccionó la técnica de interpolación y su combinación de parámetros que presentó los mejores resultados.

3 DATOS

3.1 INFORMACIÓN PRIMARIA

El conjunto de datos de brillos solar suministrado por el IDEAM incluía 497 estaciones que hacen parte de su red meteorológica y que fueron usadas para la elaboración de los mapas del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia (Benavides-Balleteros, Simbaqueva-Fonseca, & Zapata-Lesmes, 2017). Esta información, fue entregada como valores diarios de horas de luz solar (h/día) medidos en cada estación. Adicionalmente, fue suministrada información de 40 estaciones de radiación solar del IDEAM, medida en kWh/m² a una resolución temporal horaria.

3.2 INFORMACIÓN SECUNDARIA

Se adquirieron datos de precipitación, elevación y de irradiancia, variables que presentan una correlación con la radiación solar. Se obtuvo información satelital de irradiancia a partir de un mapa de flujo de radiación de onda corta en superficie (SIS, por sus siglas en inglés) (Karlsson et al., 2012) presentado en la Figura 4, que hace parte del conjunto de datos satelitales CLARA-A1 que abarca datos globales de propiedades de las nubes, albedo de la superficie y de radiación en la superficie generados por EUMETSAT Climate Monitoring Satellite Application Facility (CM SAF). Este producto entrega información de flujo de radiación solar medida en vatios por metro cuadrado por día (W/m²/día), a una resolución temporal diaria con un periodo de registro desde 1982 al 2009 y a una resolución espacial en de 0,25°.

Se adquirió información precipitación proveniente de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM, por sus siglas en inglés), satélite diseñado para estudiar la distribución y la variabilidad de la precipitación en los trópicos como parte del ciclo del agua en el sistema climático actual (NASA, 2015). Se usó el producto 3B42 (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2016) que contiene información de precipitación acumulada diaria en las regiones tropicales y subtropicales expresada en milímetros (mm), con un periodo de registro desde 1998 al 2016 y una resolución espacial de 0,25°. El mapa de precipitación acumulada para Colombia se muestra en la Figura 5.

Se obtuvo un Modelo Digital de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) para Colombia, que fue generado por el National Geophysical Data Center (NGDC) de la National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA), a partir del Global Land One-km Base Elevation (GLOBE) Project (GLOBE Task Team et al., 1999), el cual genera datos de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 kilómetro) de elevación digital global. El DEM se presenta en la Figura 6.

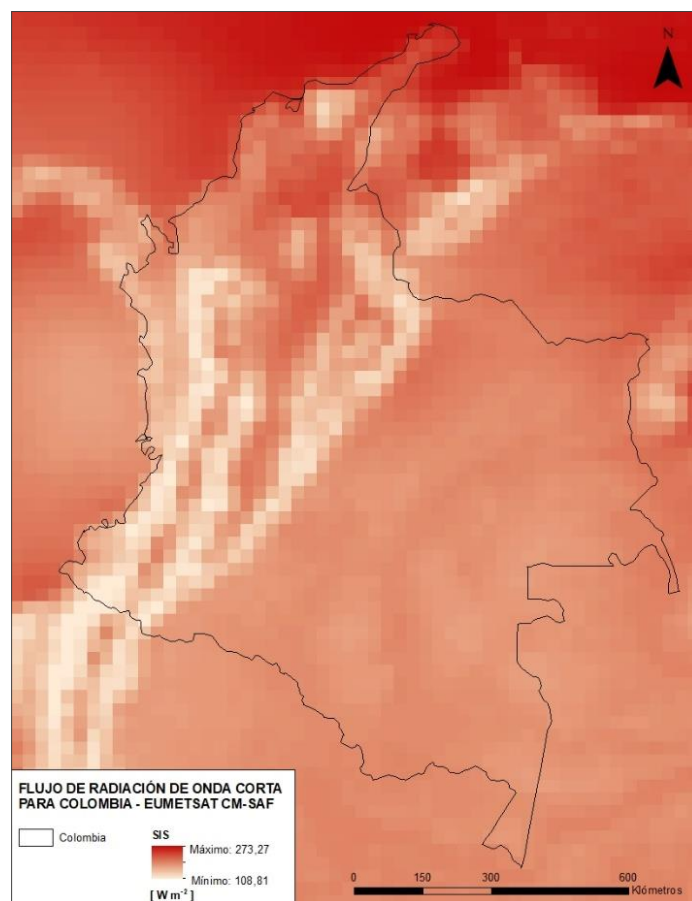


Figura 4. Mapa del flujo radiación promedio anual del producto SIS del CLARA-A1, medido en vatios por metro cuadrado por día ($\text{W/m}^2/\text{día}$).

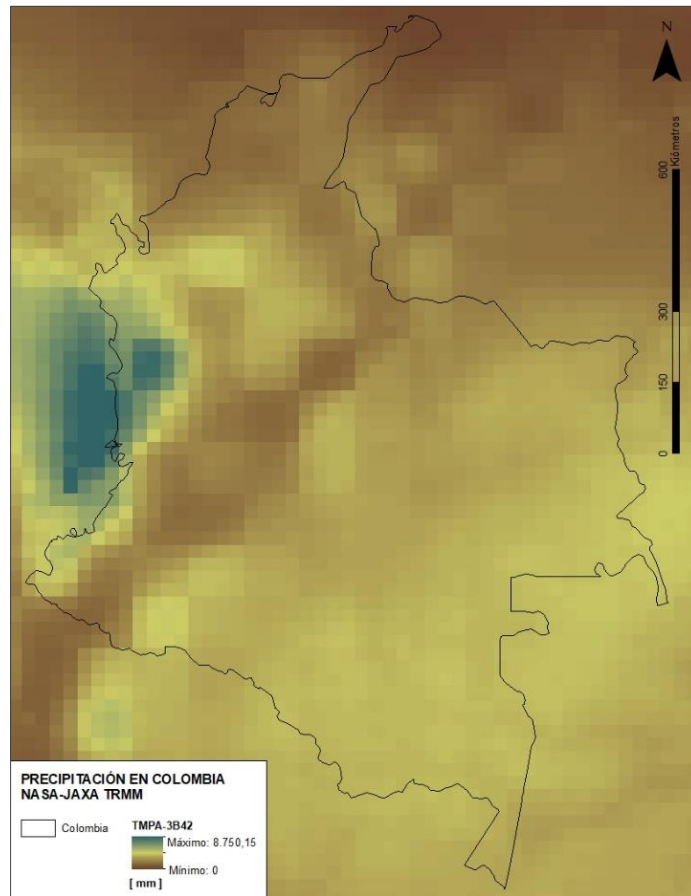


Figura 5. Mapa de precipitación diaria acumulada promedio anual del producto 3B42 del TRMM, expresada en milímetros por día (mm/día).

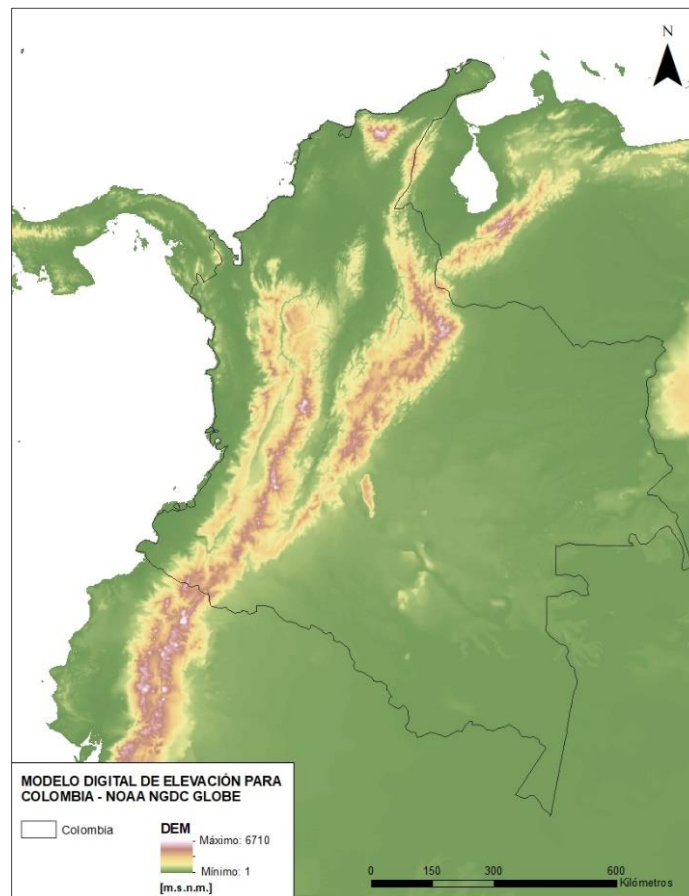


Figura 6. Mapa del modelo digital de elevaciones del GLOBE, expresado en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

3.3 DELIMITACIÓN REGIONAL

3.3.1 Zonificación hidrográfica

En el año 1978, el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT) mediante la Resolución 0337 de ese mismo año, ajustó unas delimitaciones en el territorio colombiano que correspondían a cinco áreas hidrográficas: Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico; cada una de ellas dividida en zonas hidrográficas y éstas, en subzonas hidrográficas. Tiempo después, esta clasificación fue adoptada por el IDEAM, no sólo con el fin de adquirir un sistema de codificación de las estaciones hidrometeorológicas del país, sino también para permitir la “gestión del recurso hídrico y la aplicación de políticas y planes de ordenación y manejo de cuencas”. La Figura 7 presenta esta zonificación a nivel de subzonas, zonas y áreas hidrográficas de Colombia (IDEAM, 2013).



Figura 7. Zonificación hidrográfica de Colombia adoptada por el IDEAM.

3.3.2 Zonificación climática

La zonificación hidrográfica anteriormente expuesta, surgió con el objetivo de facilitar la gestión del recurso hídrico, pues definía cinco zonas en el territorio colombiano a través de la delimitación de macrocuencas de los ríos más importantes que atraviesan el país. Si bien es una zonificación válida, no sería la más adecuada para este estudio. Es por lo anterior que se adoptó una nueva zonificación propuesta por el Grupo de Investigación EnergEIA de la Universidad EIA, en la cual se divide el país en regiones delimitadas por la cordillera de los Andes. En términos generales, estas regiones presentan una climatología común.

Se delimitaron cuatro regiones climáticas: Pacífico, Andes, Caribe y Orinoco-Amazonía. La región del Pacífico se definió como la franja entre el límite continental colombiano con el Océano Pacífico y los puntos más altos de la cordillera occidental. La región climática Andes, se propuso como la franja entre los puntos más altos de la cordillera occidental y los de la cordillera oriental, abarcando la extensión total de los valles interandinos. La región Caribe, por su parte, se definió desde una línea trazada a los 7,5°N, abarcando el norte de Colombia hasta el límite continental con el Mar Caribe, incluyendo el archipiélago de San Andrés y Providencia. Y la región Orinoco-Amazonía, se definió como el área oriental y suroriental del país delimitada por los puntos más altos de la cordillera oriental y los límites

terrestres con Venezuela, Brasil y Perú. La zonificación propuesta se presenta en la Figura 8.

El producto 3B42 se utilizó para apoyar la delimitación de las regiones climáticas, que muestra en la Figura 5. Se observa que las regiones presentan diferentes comportamientos en la intensidad de la precipitación: Pacífico con un alto régimen producto de la humedad que recibe desde el Océano Pacífico; Andes con un comportamiento modulado por la barrera orográfica de la cordillera andina; Caribe con valores bajos de precipitación; y Orinoco-Amazonía, presentando valores medios en toda su extensión. Esta última región fue definida, además de los mencionado anteriormente, con el objetivo de agrupar las áreas del país que no cuentan con una significativa cantidad de información de brillo solar, debido a su baja densidad de estaciones.

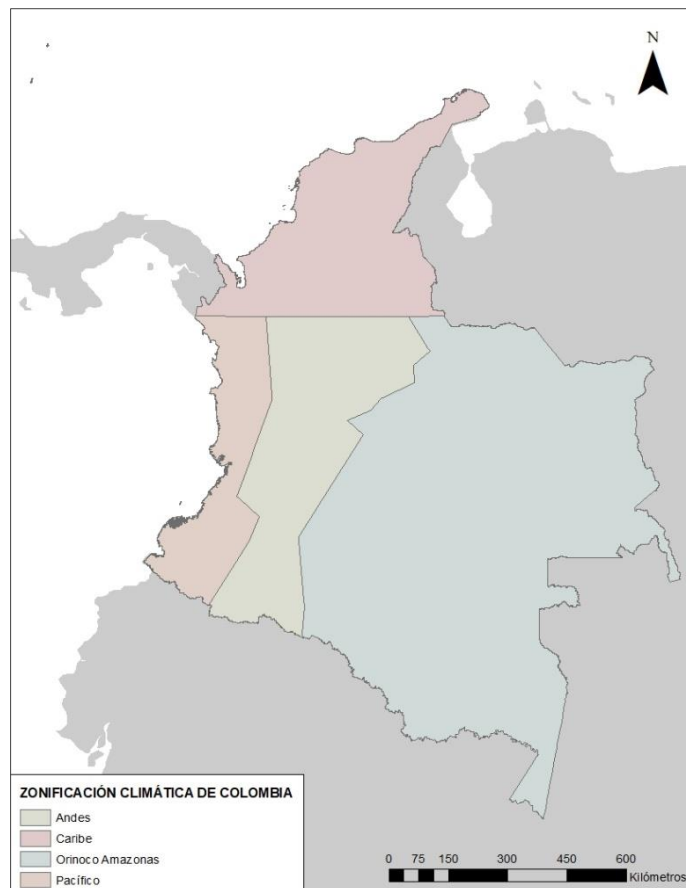


Figura 8. Zonificación climática de Colombia adoptada en este estudio.

4 SELECCIÓN DE METODOLOGÍAS DE INTERPOLACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN PRIMARIA Y SECUNDARIA

4.1 SELECCIÓN DE METODOLOGÍAS DE INTERPOLACIÓN

Se evaluaron cuatro metodologías de interpolación: IDW, TPS, OK y UK. Estas metodologías se escogieron debido a que han sido usadas en estudios anteriores que involucraban interpolaciones de las siguientes variables climáticas: irradiancia, irradiación, brillo solar, precipitación, temperatura del aire, temperatura superficial del mar, humedad y evapotranspiración. En la Tabla 1 se resumen los estudios encontrados en la literatura de los últimos 10 años que aplican las metodologías seleccionadas.

Tabla 1. Resumen de estudios climáticos en donde se aplican las metodologías de interpolación seleccionadas.

Estudio	Proceso	Metodología	Conclusiones
<i>Loghmani, Timoumi, & Messadi (2018)</i>	Evaluación de dos modelos de interpolación espacial de radiación solar global mensual en Túnez	IDW	IDW es más fácil de implementar y un poco más preciso que ANN
			El uso de datos de entrada de sitios con condiciones climáticas similares a la región predicha aumenta la precisión del modelo IDW
<i>Berndt & Haberlandt (2018)</i>	Evaluación de varias técnicas de interpolación espacial de variables climáticas: precipitación, temperatura, humedad, nubosidad, duración de luz solar y velocidad del viento, con resoluciones horarias y anuales en Alemania	OK	Las técnicas geoestadísticas tienen mejor rendimiento para todas las variables climáticas
		KED	La resolución temporal, la variabilidad espacial y la información adicional, tienen mayor influencia en la precisión del modelo que la densidad de estaciones
<i>Jeon et al. (2017)</i>	Comparación de métodos de interpolación	IDW	Las metodologías geoestadísticas presentaron

	geoestadísticos y modelos de simulación estocástica de radiación solar diaria en una superficie horizontal, en el sur de Quebec, Canadá		mejor representación espacial que los modelos de simulación en las regiones con densidad alta de estaciones
		OK	Entre las metodologías geoestadísticas utilizadas, el OK es el que tiene el mejor desempeño, seguido por IDW
<i>Rodríguez-Amigo, Díez-Mediavilla, González-Peña, Pérez-Burgos, & Alonso-Tristán (2017)</i>	Evaluación de métodos matemáticos de interpolación para la estimación de irradiación global horizontal en Castilla-León, España	IDW	OK es el mejor método de interpolación comparado con los otros, al obtener los errores más bajos
		Spline	
		OK	
<i>Jamaly & Kleissl (2017)</i>	Interpolación espaciotemporal y predicción de datos de irradiancia solar	OK	El método de Kriging espaciotemporal puede ser aplicado a datos medidos en tierra y a datos satelitales de irradiancia
			Para interpolaciones espaciales, es mejor que los datos en tierra no estén estructurados y estén dispersos, pero cuando se escala temporalmente o se pronostica, OK es prometedor para ambas fuentes de información en combinación
<i>Mendez & Calvo-Valverde (2016)</i>	Evaluación de métodos de interpolación determinísticos y geoestadísticos mediante un modelo hidrológico, para generar una serie de tiempo de precipitación diaria y horaria	IDW	La actuación de los métodos determinísticos es comparable con los métodos geoestadísticos en las series diarias
		OK	En las series horarias los métodos determinísticos mostraron un desempeño considerablemente mayor
		KED	
<i>Plouffe, Robertson, & Chandrapala (2015)</i>	Comparación de técnicas de interpolación para la generación de mapas de precipitación mensual en Sri Lanka, usando múltiples criterios y fuentes de información auxiliares	IDW	La mayoría de los métodos se aproximaron a la distribución espacial de las precipitaciones a un nivel alto para mayo
		OK	TPS se comporta mejor con precipitaciones altas

		TPS	Noviembre mostró una capa suavizada parecida al patrón espacial de los rásteres TRMM, posiblemente debido al patrón espacial que produce TPS
<i>Bachour & Perez-Astudillo (2014)</i>	Generación de mapas de radiación solar global – GHI sobre Qatar, basados en mediciones terrestres de GHI diaria, y comparación con mapas a partir de base de datos de HelioClim1 en las mismas ubicaciones	IDW	La combinación de datos solares satelitales y terrestres proporcionan valores más confiables con menores incertidumbres
<i>Wagner, Fiener, Wilken, Kumar, & Schneider (2012)</i>	Comparación y evaluación de esquemas de interpolación espacial de precipitación diaria en regiones con escasez de datos	IDW	Las diferencias entre métodos pueden ser significativas en una escala temporal y espacial más pequeña (mensual)
		OK	La elección de las covariables tuvo un impacto significativo en la cantidad de precipitación y escorrentía
<i>Tait & Liley (2009)</i>	Interpolación de radiación solar diaria para Nueva Zelanda usando información satelital de cobertura de nubes	TPS	Se obtuvo el menor error al calcular campos de radiación con los datos satelitales

4.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

4.2.1 Análisis de correlación

Para aplicar UK, es necesario que las variables secundarias estén correlacionadas con la variable de estudio. Por esta razón, se realizó una cuantificación estadística bivariada de la correlación entre el brillo solar y cada una de las variables secundarias: elevación, precipitación acumulada y flujo de radiación de onda corta. Las Figura 9, Figura 10 y Figura 11 presentan los diagramas de dispersión contruidos a partir de los valores de las variables secundarias extraídos en la localización de las 276 estaciones de brillo solar. Adicionalmente, se presenta el coeficiente de correlación de Pearson R , que es la relación entre la covarianza de los valores observados y estimados y el producto de sus desviaciones estándar (Böhner & Bechtel, 2017). Este coeficiente se constituye como una medida de correlación entre dos variables.

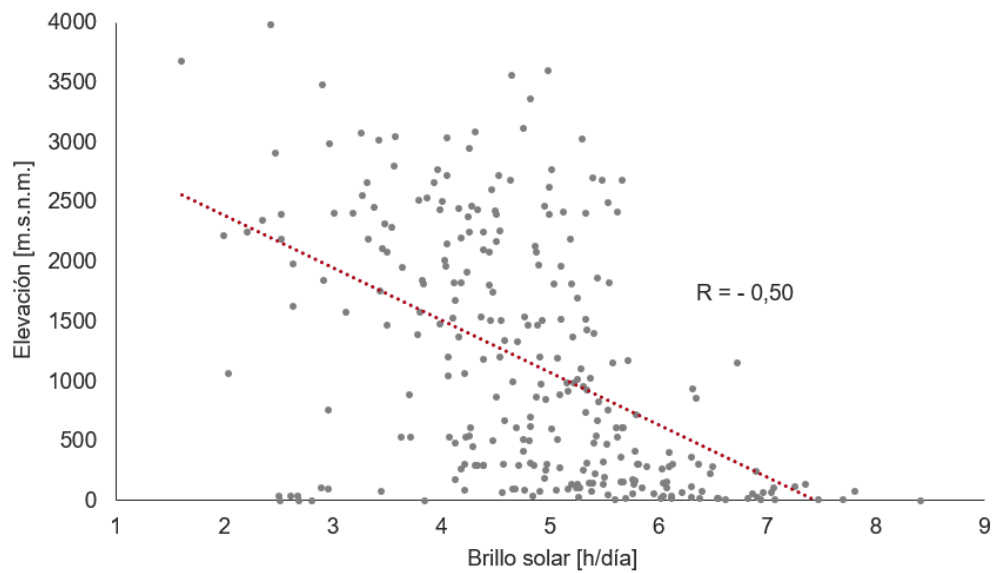


Figura 9. Diagrama de dispersión de los valores de brillo solar y elevación para las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM, y coeficiente de correlación de Pearson R.

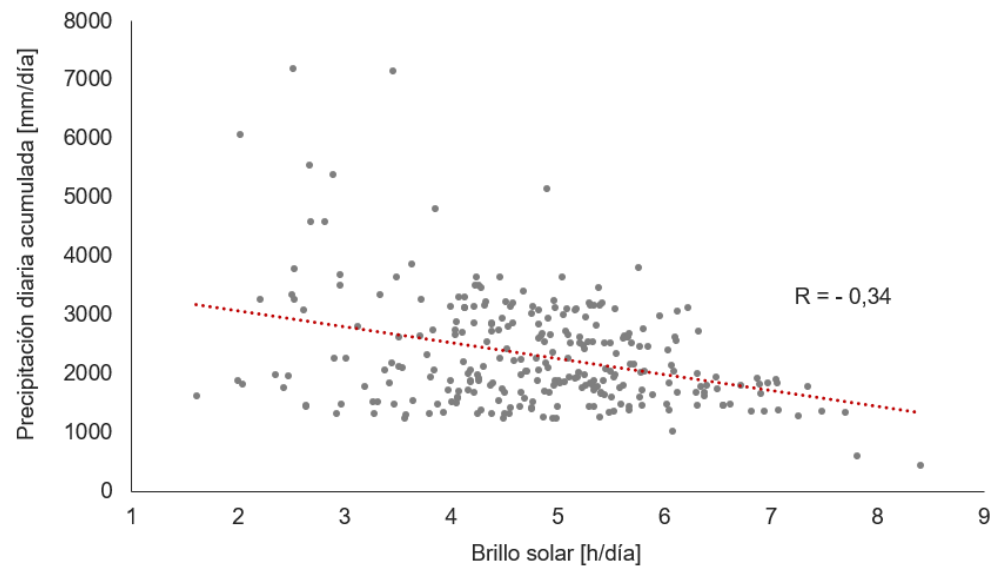


Figura 10. Diagrama de dispersión de los valores de brillo solar y precipitación diaria acumulada para las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM, y coeficiente de correlación de Pearson R.

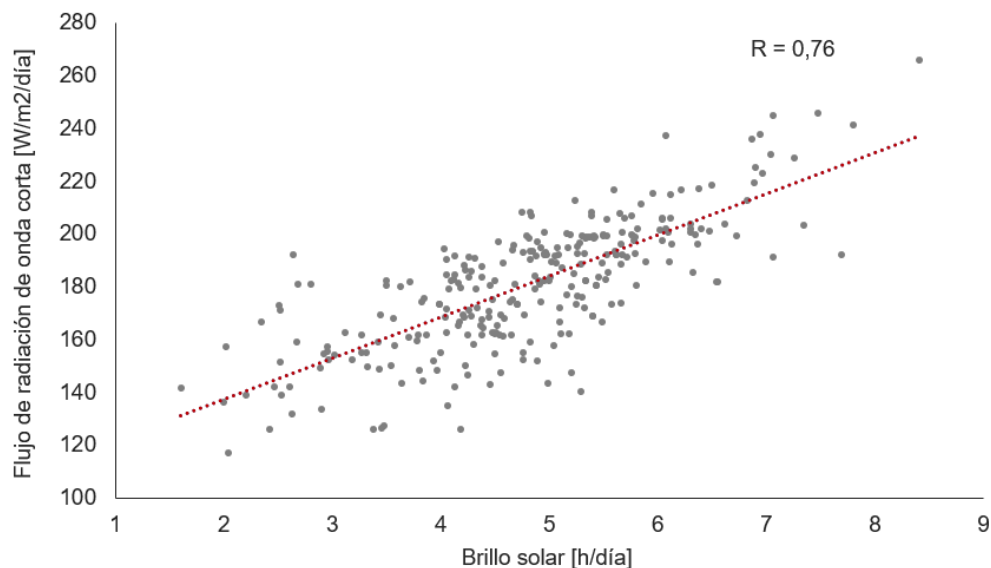


Figura 11. Diagrama de dispersión de los valores de brillo solar y flujo de radiación de onda corta para las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM, y coeficiente de correlación de Pearson R.

Se observa que la mayor correlación con el brillo solar la presenta el flujo de radiación de onda corta, al mostrar un buen ajuste de la línea de tendencia y un coeficiente de correlación de Pearson de 0,76, que representa una relación alta entre estas dos variables. La menor correlación con el brillo solar se presenta con la precipitación diaria acumulada, que muestra puntos muchos más dispersos, seguida por la elevación. Ambas variables presentan una relación inversa con el brillo solar, lo que quiere decir que cuando una de estas variables aumenta, la otra decrecerá.

Las tres variables secundarias presentan algún grado de relación con nuestra variable de estudio; por lo tanto, sirven como información auxiliar que permite explicar la variabilidad espacial de nuestra variable, especialmente en zonas en las que no se cuenta con mucha información. A continuación, se da una breve descripción de los elementos más importantes identificados en la información recolectada de estas variables.

4.2.2 Análisis de información secundaria

En el DEM para Colombia que se presenta en la Figura 6, se observan los sistemas montañosos que hacen parte del relieve colombiano. El más importante de ellos corresponde a la cordillera de los Andes que, atravesando a Ecuador, entra a Colombia por el suroccidente y posteriormente se divide en tres ramales: las cordilleras occidental, central y oriental. Se observan también algunos sistemas montañosos independientes, como la Sierra Nevada de Santa Marta al norte del país, la Serranía de la Macarena al sur de la cordillera oriental, y la Serranía de Chiribiquete al sur del país.

En el producto 3B42 de precipitación diaria acumulada que se muestra en la Figura 5 para Colombia, se puede observar que la zona con valores más altos de precipitación se ubica en parte del departamento del Chocó, al occidente del país, por la existencia de una alta cobertura nubosa durante gran parte del año, lo que impide que una parte importante de la energía del sol pueda llegar a la superficie. Este fenómeno será explicado más adelante.

En el mapa del producto SIS para Colombia presentado en la Figura 4 se puede observar que los valores más altos de irradiancia se presentan en algunas zonas en el norte del país, y los más bajos se encuentran en las zonas de alta elevación sobre el nivel del mar, correspondientes principalmente a los tres ramales en los que se divide la cordillera de los Andes dentro del territorio colombiano y al sistema montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta. Los valores más bajos se presentan, además, en el occidente y noroccidente del país, donde se ubica el departamento del Chocó dentro de la región Pacífico. Los valores medios se presentan en el sur y el oriente del territorio, y los valores más altos, en las depresiones que separan las tres cordilleras.

Aunque la radiación solar se ve influenciada por otros factores climáticos y geográficos, lo anterior puede evidenciar la correlación existente entre la irradiancia y la elevación, mostrando que hay menor flujo de radiación que llega a la superficie en las zonas más altas y un mayor flujo en los valles interandinos y, principalmente, en algunas zonas en el norte de Colombia con muy baja elevación. La costa Pacífica, por otra parte, presenta un comportamiento climático más complejo modulado por un fenómeno hidroclimático llamado el Chorro del Chocó, en el cual, “una corriente de vientos proveniente del Océano Pacífico que transporta grandes cantidades de humedad hacia el interior del país interactúa con la cordillera de los Andes y con los vientos alisios del este para favorecer grandes cantidades de precipitación” sobre la región (Poveda, 2004).

4.2.3 Tratamiento de información primaria

Las depuraciones aplicadas a la información de brillo solar se realizaron con el fin de eliminar datos no representativos que pudieran modificar el comportamiento de la serie a niveles mensuales y anuales. Asimismo, con el objetivo de que la información a usar tuviera una climatología completa. Es decir, que los registros en todo el periodo hayan podido captar eventos climáticos a diversas escalas temporales, incluyendo desde eventos que se presentan a escalas diaria, intra-anual y anual, hasta eventos macroclimáticos que suceden en una escala interanual como la ocurrencia del ENSO, que tiene una componente de alta recurrencia (entre 2 a 2,5 años), de baja recurrencia (entre 4 y 5 años) y un énfasis en el ciclo anual. (Poveda, 2004).

Se seleccionaron en total 276 estaciones luego de este proceso, descrito en detalle en el Tratamiento de la información. La localización y el periodo de registro de las estaciones seleccionadas se presenta en el Anexo 1. Los promedios mensuales y anuales multianuales de brillo solar diario construidos para las 276 estaciones se muestran en la Tabla 2 como un ejemplo de una estación en particular, en donde las columnas con los números del 1 al 12 representan los valores promedio de brillo solar para los 12 meses del año, y la columna ‘Anual’ corresponde al promedio de todos los meses. El Anexo 2 presenta los promedios mensuales y anuales para las 276 estaciones de brillo solar.

Tabla 2. Promedios mensuales y anual multianual de brillo solar expresados en horas por día (h/día) para una estación en particular.

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Anual
MANSA LA	4,96	5,02	4,79	4,23	4,68	4,88	6,17	6,17	5,02	4,24	4,17	4,37	4,89

Las estaciones de irradiación seleccionadas en la depuración descrita en Tratamiento de la información fueron 17. Al igual que para las de brillo solar, el Anexo 3 presenta estas estaciones con su altitud, latitud, longitud y periodo de registro.

La Figura 12 muestra la distribución de las 276 estaciones de brillo solar y de las 17 estaciones de irradiación seleccionadas. Existe una buena cobertura de estaciones de brillo solar en el centro y norte del país, pero en menor proporción en el occidente. La zona oriental y sur del país presenta una crítica escasez de estaciones, debido a su baja densidad poblacional y difícil acceso. El número de estaciones de irradiación es limitado, más aún cuando presenta una cantidad importante de datos faltantes y periodos de registro significativamente cortos.

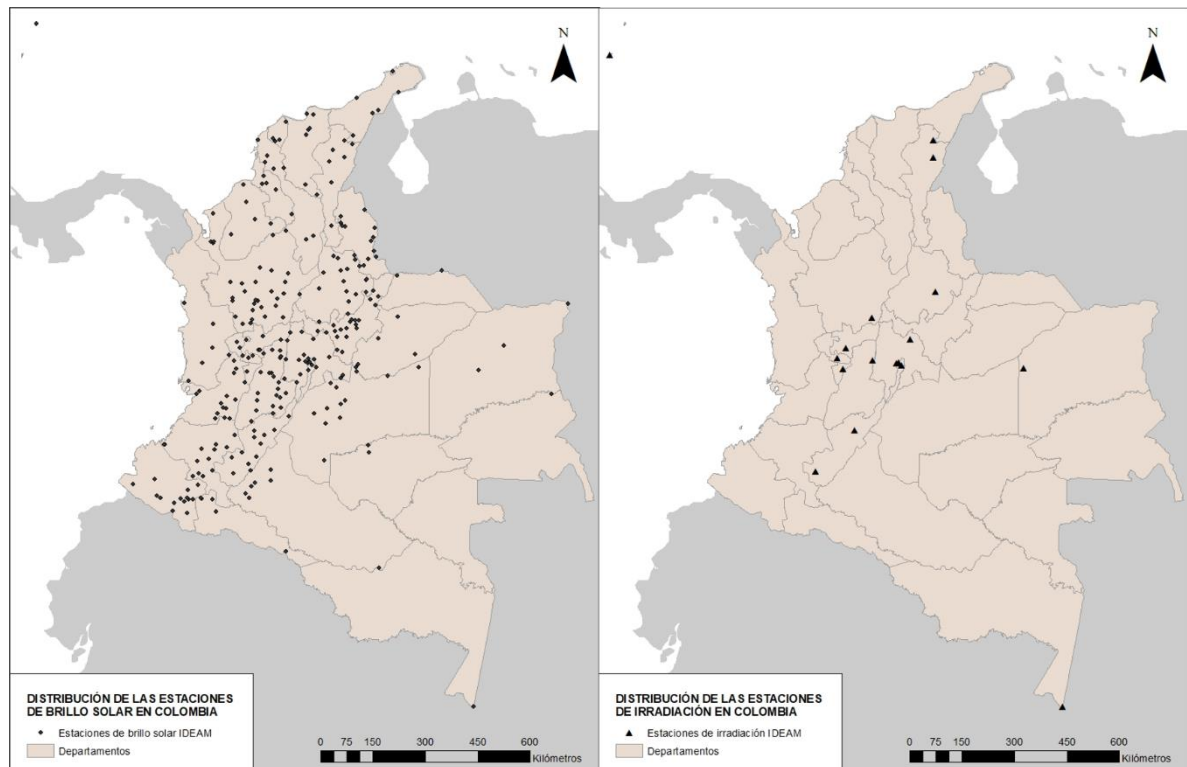


Figura 12. Distribución de las 276 estaciones de brillo solar seleccionadas (izquierda) y de las 17 estaciones de irradiación seleccionadas (derecha).

4.2.4 Delimitación regional

4.2.4.1 Zonificación hidrográfica

En el Anexo 4 se presenta una breve descripción general de cada una de las regiones hidrográficas adoptadas por el IDEAM y de su comportamiento climático a partir del análisis de sus ciclos anuales de brillo solar, construidos con los valores promedio mensuales de las 276 estaciones usadas en este estudio.

4.2.4.2 Zonificación climática

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las regiones climáticas adoptadas en este estudio mediante un análisis de sus ciclos anuales de brillo solar. En la Figura 13 se presentan los valores medios del ciclo anual de brillo solar para cada región climática, calculada de la misma forma que para la gráfica correspondiente en la zonificación hidrográfica. La Figura 14 muestra los valores medios del ciclo anual de brillo solar de cada estación para las regiones climáticas.

4.2.4.2.1 Andes

Se ubica en el centro del país, delimitada por las cordilleras oriental y occidental, en donde se encuentra la mayor parte de la población colombiana. Abarca la totalidad de los departamentos de Caldas, Quindío y El Tolima, gran parte de Antioquia, Risaralda, Valle del Cauca, Putumayo, Huila, Cundinamarca y Santander, y áreas muy pequeñas de Bolívar, Chocó, Boyacá, Cauca, Nariño y Caquetá. Tiene un área de 193.343,62 km², que corresponde al 17% del área de Colombia, en donde se encuentran 129 estaciones de brillo solar y 10 de radiación solar.

La Figura 13 muestra un comportamiento bimodal en el ciclo anual de brillo solar, con dos trimestres de baja intensidad de brillo solar correspondientes a marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON). Presenta un valor máximo de 5,4 y un valor mínimo de 3,9 horas de luz solar diarias.

Esta tendencia en el brillo solar tiene similitudes importantes con el ciclo anual de precipitación, pues en la región andina se presentan dos temporadas lluviosas, que corresponden a los trimestres MAM y SON. Esta particularidad es causada por la gran influencia de la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en la hidroclimatología de los valles interandinos, en la cual convergen corrientes de aire del hemisferio norte y sur que crean una larga banda continua de nubosidad facilitando la precipitación. Adicionalmente, los vientos del Chorro del Chocó exhiben un marcado ciclo anual en el centro del país, siendo más fuertes en el trimestre SON y más débiles en los meses de febrero y marzo, lo cual puede explicar la intensidad de la segunda temporada lluviosa del año sobre la primera (Poveda, 2004).

En adición, los vientos alisios del sureste del país transportan grandes cantidades de humedad hacia los Andes, que se constituyen como una barrera orográfica, induciendo la precipitación sobre estos valles y la formación de climas locales y regionales muy complejos (Poveda, 2004).

4.2.4.2.2 Caribe

La región del Caribe se ubica en el norte del país, y comprende los departamentos de La Guajira, Atlántico, Magdalena, Cesar, Sucre, Córdoba y el Archipiélago de San Andrés y Providencia, la mayor parte del territorio de Bolívar y Norte de Santander, y una pequeña parte de Antioquia, Chocó y Santander. Posee un área de 183.511,65 km², que representa el 16% del área total del país, dentro de la cual se ubican 63 estaciones de brillo solar y 3 de irradiación.

La Figura 13 indica un comportamiento bimodal en la serie anual de brillo solar para la región, presentando dos valles de baja intensidad correspondientes al bimestre abril-mayo y al trimestre SON. Con un valor máximo de 7,2, siendo el valor mayor de todas las regiones, y un valor mínimo de 5,1, correspondientes a los meses de enero y mayo respectivamente.

Con respecto a la serie construida con la zonificación hidrográfica, los valores medios de la nueva zonificación para el Caribe aumentan en todos los meses, siendo el más representativo el valor de enero aumentando en 1 hora de luz solar; sin embargo, conservan un comportamiento similar.

Con respecto al ciclo anual para cada estación presentado en la Figura 14, se da un aumento significativo en el número de estaciones, que otorga una mayor representatividad al comportamiento climático de la región; sin embargo, no se presentan cambios importantes en los rangos entre los cuales se encuentran los valores de las series de brillo solar.

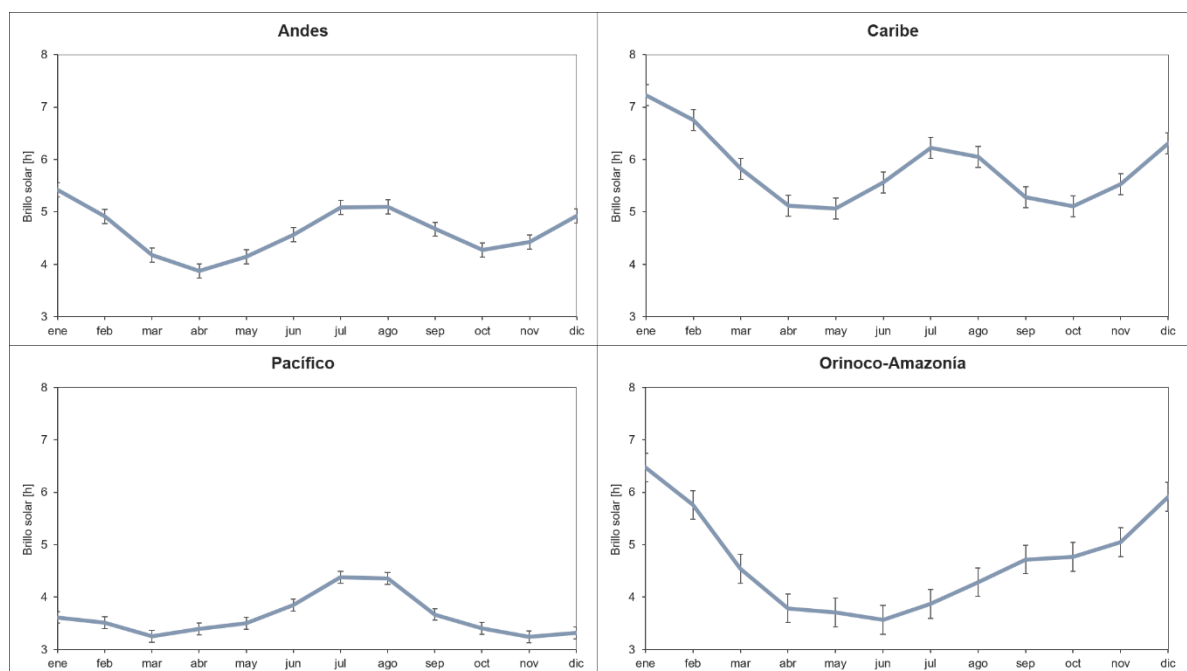


Figura 13. Valores medios del ciclo anual de brillo solar para las regiones climáticas.

4.2.4.2.3 Pacífico

La región del Pacífico se encuentra al occidente del territorio nacional abarcando la mayor parte de los departamentos de Chocó, Cauca y Nariño, y una pequeña parte de los departamentos de Antioquia, Risaralda y Valle del Cauca. Tiene una extensión de 98.768,33 km², que representa casi el 9% del área del país, en donde se ubican 29 estaciones de brillo solar.

Se observa que la región del Pacífico presenta un comportamiento unimodal con valores de poca variación durante el año, pero mostrando un pico de brillo solar en los meses de

julio y agosto. Registra un valor máximo de 4,4, correspondiente al mes de julio, y un valor mínimo de 3,2 horas de luz solar en el mes de marzo.

En general, el Pacífico presenta valores por debajo de las otras regiones, lo que se explica por el fenómeno mencionado anteriormente y la ocurrencia de eventos La Niña que golpean con mayor intensidad las regiones occidentales de Colombia (Poveda, 2004).

En la Figura 14 el Pacífico no presenta variaciones significativas en las estaciones ubicadas en su área con respecto a las correspondientes en la zonificación hidrográfica.

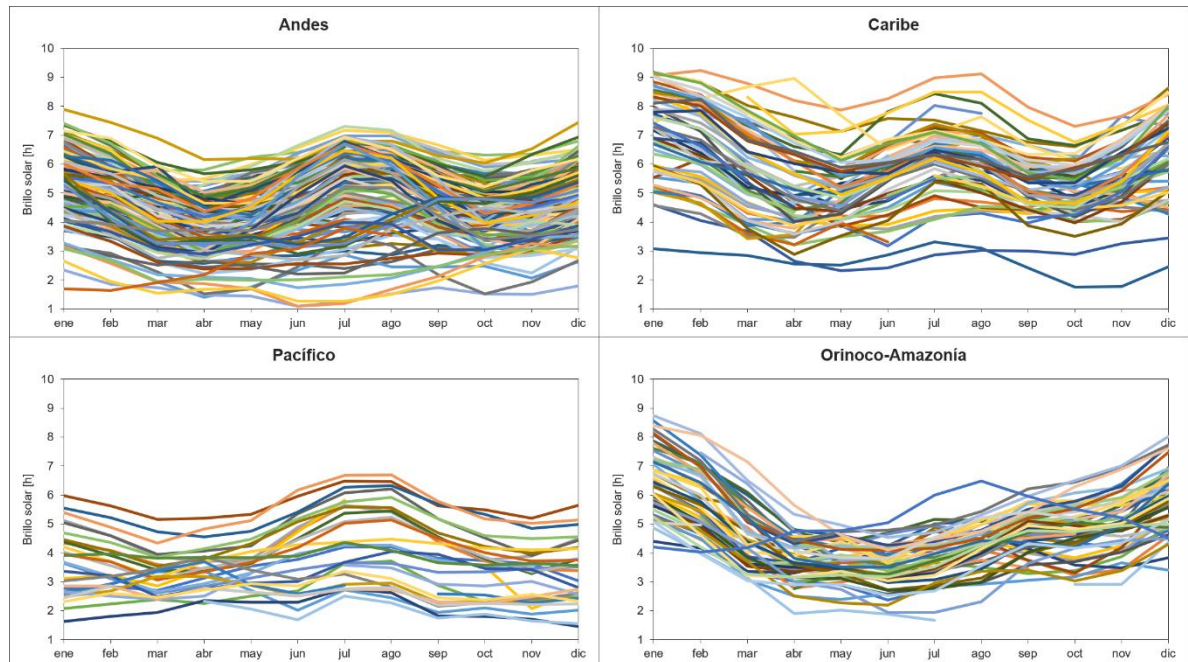


Figura 14. Valores medios del ciclo anual de brillo solar de cada estación para las regiones climáticas.

4.2.4.2.4 Orinoco-Amazonía

La región Orinoco-Amazonía se ubica en el este y sureste del país. Abarca los departamentos de Amazonas, Guainía, Guaviare, Vaupés, Arauca, Casanare, Meta, gran parte de Boyacá, Caquetá, y una pequeña área de Norte de Santander, Cundinamarca, Santander, Huila y Putumayo. Tiene un área de 664.813,53 km², representada en el 58% del territorio nacional. En ella se encuentran 55 estaciones de brillo solar y 4 de radiación solar. Siendo la región climática de mayor extensión, tiene la menor densidad de estaciones de brillo y radiación solar debido a que alberga muy poca parte de la población colombiana.

En la Figura 13 se puede observar su comportamiento unimodal, con los valores medios más bajos en los meses abril-mayo-junio-julio (AMJJ) y valores altos en el bimestre diciembre-enero. Su valor máximo es de 6,5 y el mínimo de 3,6 horas de brillo solar, correspondientes a los meses de enero y junio respectivamente. Lo anterior puede ser explicado por el régimen de precipitación en la zona. De acuerdo con el IDEAM (2005), la Amazonia colombiana exhibe un ciclo unimodal de precipitación, y registra los valores más bajos en los meses de diciembre y enero, y los máximos en mayo y junio.

No obstante, debido a la pobre cobertura de estaciones en la región, su ciclo anual de brillo solar no refleja el real comportamiento de la variable en la zona, ni puede inferir de una forma acertada la cobertura de nubes y el régimen de precipitación en la totalidad del Amazonas, en donde se pueden presentar variaciones climáticas importantes desde su hemisferio norte hasta el hemisferio sur.

5 INTERPOLACIONES ANUALES DE BRILLO SOLAR E IRRADIACIÓN

La Tabla 3 presenta los parámetros que fueron modificados para generar diferentes combinaciones en las metodologías de interpolación aplicadas, con su valor específico y su respectiva codificación para facilitar su identificación dentro de este estudio.

Tabla 3. Parámetros con sus valores modificados para IDW, TPS, OK y UK, y su respectiva codificación.

Parámetros	Valor	Codificación
Potencia	1,5	P1.5
	2	P2
	3	P3
	Óptima	POp
Tipo de sector	Completo	Completo
	Cuatro	Cuatro
	Cuatro45°	Cuatro45°
	Ocho	Ocho
Tipo de modelo	Estable	Estable
	Circular	Circular
	Esférico	Esférico
	Tetraesférico	Tetra
	Pentaesférico	Penta
	Exponencial	Exponen
	Gaussiano	Gaussiano
	Racional cuadrático	RacCuad
	Efecto de hoyo	EfectoHoyo
	K-Bessel	KBessel
	J-Bessel	JBessel
Análisis exploratorio de tendencia de superficie - ESTA	30	30
	60	60
	90	90
Información secundaria	DEM GLOBE - NOAA	DEM
	SIS CLARA-A1 - NASA	CLARA
	3B42 TRMM - NASA	TRMM

5.1 BRILLO SOLAR

5.1.1 Elaboración de las interpolaciones

Para la elaboración de las interpolaciones se utilizaron tres conjuntos de prueba que se generaron luego de extraer tres veces consecutivas 50 estaciones de validación de manera aleatoria dentro de las 276 estaciones de brillo solar seleccionadas. Los tres conjuntos de validación, como su nombre lo indica, fueron aquellos con los que se validaron los campos generados de brillo solar. Las estaciones de validación se presentan en los Anexos Anexo 5, Anexo 6 y Anexo 7.

A partir de los parámetros que fueron modificados para cada una de las metodologías evaluadas, se conformaron 42 combinaciones que incluían valores específicos de estos parámetros y el uso de las variables secundarias definidas en capítulos pasados. Se realizaron entonces un total de 126 interpolaciones, correspondientes al uso de los tres conjuntos de prueba para cada una de las combinaciones. A continuación, se describen los parámetros que se variaron dentro de cada metodología.

5.1.1.1 TPS

Para la interpolación con TPS dentro del grupo Funciones de Base Radial (RBFs, por sus siglas en inglés), se modificaron tres parámetros: la función de Kernel, el parámetro de Kernel asociado a la función escogida y el tipo de sector del vecindario de búsqueda. Los parámetros número máximo y mínimo de vecinos, ángulo, y semieje mayor y menor se mantuvieron por defecto.

La función Kernel determina cómo encajará la superficie creada en los valores medidos. El parámetro Kernel, por otra parte, controla el grado de variación a pequeña escala en la superficie; entre más alto sea su valor, la superficie estará más suavizada (ESRI, 2018). La Tabla 4 presenta las diferentes funciones de Kernel disponibles dentro de las RBFs con su parámetro asociado. El tipo de sector de búsqueda, en cambio, es el modo de conformación de los sectores en búsqueda del vecindario, que pueden estar divididos en cuatro sectores, en ocho o sin división alguna. Los diferentes tipos de sector disponibles en ArcMap se representan en la Figura 15.

Tabla 4. Tipos de función Kernel y su parámetro asociado dentro de los RBFs.

Función Kernel	Parámetro Kernel
<i>Spline completamente regularizado</i>	0,000551951
<i>Spline con tensión</i>	0,000397014
<i>Multicuadrático</i>	0
<i>Multicuadrático inverso</i>	9094,330817996
<i>TPS</i>	1E+20

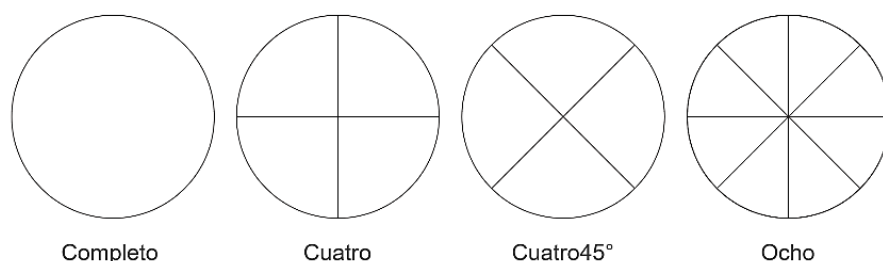


Figura 15. Tipos de sector de búsqueda del vecindario.

Para todas las interpolaciones usando RBFs, se seleccionó la función Kernel TPS con su parámetro Kernel asociado de $1E+20$. Se varió entonces el tipo de sector, quedando 4 combinaciones de TPS con cada uno de los sectores disponibles: Completo, Cuatro, Cuatro con 45° y Ocho.

5.1.1.2 IDW

Para la interpolación IDW se modificaron parámetros potencia y tipo de sector del vecindario de búsqueda. Los parámetros tipo de vecindario, número máximo y mínimo de vecinos, ángulo, y semieje mayor y menor se mantuvieron con sus valores establecidos por defecto.

Para IDW, se realizaron las primeras interpolaciones variando la potencia. Se escogieron los valores de potencia de 1,5, 2, 3 y el valor óptimo arrojado por el *Goestatistical Wizard* de ArcMap, manteniendo el tipo de sector de búsqueda Completo. Los valores óptimos de potencia para cada conjunto de prueba se presentan en la Tabla 5. Las demás interpolaciones se realizaron con los dos valores de potencia que mejor resultados arrojaron en la validación: 1,5 y 2, y con el tipo de sector de búsqueda Cuatro 45° , que junto con el Completo presentó los mejores resultados en el proceso de validación para TPS. Finalmente, se obtuvieron seis combinaciones de parámetros en esta metodología: cuatro con todos los valores de potencia y el tipo de sector Completo, y 2 adicionales con los dos mejores valores de potencia y el tipo de sector Cuatro 45° .

Tabla 5. Valores óptimos de potencia para los conjuntos de datos de prueba de brillo solar.

Conjunto	Potencia (p)
1	2,743
2	2,794
3	2,412

5.1.1.3 OK

Dentro de los parámetros para aplicar OK, se variaron el tipo de sector del vecindario de búsqueda y el tipo de modelo ajustado en el variograma. Los parámetros efecto pepita, parámetro del modelo, meseta parcial, meseta, tamaño del *lag*, número de *lags*, tipo de vecindario, y número máximo y mínimo de vecinos se mantuvieron por defecto. Los tipos de modelo incluidos en ArcMap se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Tipos de modelo del variograma.

Tipo de modelo	
Circular	Racional cuadrático
Esférico	Efecto de hoyo
Tetraesférico	K-Bessel
Pentaesférico	J-Bessel
Exponencial	Estable
Gaussiano	

Se realizaron las primeras interpolaciones con OK variando el tipo de sector de búsqueda entre los cuatro existentes, pero manteniendo el tipo de modelo Estable, con el fin de evaluar cuál de ellos presentaba un mejor resultado para Kriging. Las demás interpolaciones se realizaron variando el tipo de modelo en los diez restantes que no habían sido utilizados, y manteniendo el tipo de sector de búsqueda que mejor resultados había presentado en la validación de las primeras interpolaciones con OK: Cuatro 45°. Así, se obtuvieron 14 combinaciones de parámetros con esta metodología organizados así: cuatro, con todos los sectores de búsqueda y con el tipo de modelo Estable, y diez, con todos los tipos de modelos, a excepción del Estable, y con el tipo de sector de búsqueda Cuatro 45°.

5.1.1.4 UK

Para las interpolaciones con UK, se modificaron los siguientes parámetros: ESTA, función de Kernel y tipo de modelo ajustado en el variograma. El resto de los parámetros se mantuvieron por defecto, e incluyen los siguientes: efecto pepita, error de medición, parámetro y rango mayor asociados al tipo de modelo seleccionado, meseta parcial, tamaño del *lag*, número de *lags*, el tipo de vecindario de búsqueda, el número máximo y mínimo de vecinos y el tipo de sector.

Al aplicar UK, se ejecutaron las interpolaciones de manera independiente mediante la misma combinación de parámetros mencionados más adelante para las tres fuentes de información secundaria: SIS, 3B42 y DEM. Esta información fue ingresada como un segundo conjunto de datos de entrada en formato GEOTIFF. Al usar esta información secundaria como tendencia, dentro de los parámetros a modificar aparece un análisis de superficie de tendencia exploratoria (ETSA, por sus siglas en inglés). El ETSA adapta una tendencia a la superficie curva de los datos creada a partir de la información primaria (variable dependiente) y la información secundaria (variable independiente) (Lloyd, 2010). Su valor varía simultáneamente la función de Kernel y otros parámetros asociados.

Las interpolaciones con UK se realizaron variando dos parámetros simultáneamente: el ETSA y el tipo de modelo ajustado al variograma. Para el segundo conjunto de datos (información satelital), se usaron como valores del ETSA 30, 60 y 90; valores que pudieran tener una representatividad en una escala de 0 a 100, y la función de Kernel se mantuvo Constante; mientras que para el primer conjunto de datos (brillo solar), el valor del ETSA se mantuvo en cero y la función de Kernel se mantuvo por defecto en todas las interpolaciones.

Los tipos de modelo del variograma utilizados fueron el Estable y Esférico, modelos que presentaron buenos resultados en la validación de las interpolaciones con OK. Como el valor por defecto del tipo de sector de búsqueda correspondía a Cuatro 45°, se mantuvo este valor en todas las interpolaciones al ser el que mejor resultado presentó para OK.

De esta forma, se obtuvieron 18 combinaciones de parámetros para la metodología UK, que correspondieron al uso de tres conjuntos de datos de información satelital, tres valores de ETSA para este conjunto de datos y dos tipos de modelo del variograma.

5.1.2 Presentación de resultados

5.1.2.1 Estadísticos de validación

A partir de las validaciones realizadas con los tres conjuntos de validación para cada combinación de parámetros en las metodologías evaluadas, se obtuvo la Tabla 7, que muestra los estadísticos MBE, RMSE, MBES calculados en los procesos de validación, y el valor mínimo y máximo de la diferencia entre los valores predichos y los reales. Las diferentes combinaciones se identifican por su nombre, el cual contiene en sus primeros dígitos la metodología empleada, y posteriormente, los parámetros que fueron modificados.

Tabla 7. Cálculo de estadísticos MBE, RMSE y MBE, y valor mínimo y máximo de la diferencia entre los valores reales y predichos, a partir de los tres conjuntos de datos de validación de brillo solar para cada combinación de parámetros. MBE y RMSE expresados en horas y MBES expresado como porcentaje.

Metodología	Min	Max	MBE	RMSE	MBES
<i>IDW_P1.5_Completo</i>	-1,936	4,545	0,157	0,984	3,335
<i>IDW_P2_Completo</i>	-1,961	4,711	0,169	0,986	3,590
<i>IDW_P3_Completo</i>	-2,020	4,927	0,189	1,001	4,005
<i>IDW_POp_Completo</i>	-1,985	4,888	0,185	0,995	3,919
<i>IDW_P1.5_Cuatro45°</i>	-2,018	4,413	0,144	0,988	3,066
<i>IDW_P2_Cuatro45°</i>	-1,982	4,643	0,155	0,989	3,288
<i>TPS_Completo</i>	-1,758	4,898	0,215	0,982	4,596
<i>TPS_Cuatro</i>	-1,866	5,087	0,207	1,016	4,404
<i>TPS_Cuatro45°</i>	-2,828	5,088	0,180	1,029	3,814
<i>TPS_Ocho</i>	-1,865	5,088	0,224	1,056	4,752
<i>OK_Estable_Completo</i>	-1,940	4,690	0,165	0,968	3,510
<i>OK_Estable_Cuatro</i>	-1,861	4,766	0,172	0,965	3,648
<i>OK_Estable_Cuatro45°</i>	-1,837	4,669	0,160	0,954	3,406
<i>OK_Estable_Ocho</i>	-1,862	4,690	0,178	0,963	3,789
<i>OK_Circular_Cuatro45°</i>	-1,759	4,684	0,161	0,946	3,412
<i>OK_Esférico_Cuatro45°</i>	-1,772	4,706	0,164	0,946	3,480
<i>OK_Tetra_Cuatro45°</i>	-1,801	4,697	0,162	0,948	3,442
<i>OK_Penta_Cuatro45°</i>	-1,794	4,675	0,162	0,948	3,441
<i>OK_Exponen_Cuatro45°</i>	-1,832	4,674	0,160	0,953	3,388
<i>OK_Gaussiano_Cuatro45°</i>	-1,756	4,679	0,158	0,948	3,357

<i>OK_RacQuad_Cuatro45°</i>	-1,822	4,686	0,172	0,958	3,647
<i>OK_EfectoHoyo_Cuatro45°</i>	-1,769	4,499	0,154	0,955	3,261
<i>OK_KBessel_Cuatro45°</i>	-1,834	4,670	0,161	0,953	3,418
<i>OK_JBessel_Cuatro45°</i>	-1,831	4,722	0,167	0,954	3,544
<i>UK_TRMM_30_Estable</i>	-1,783	4,881	0,163	0,965	3,457
<i>UK_TRMM_30_Esférico</i>	-1,888	4,759	0,185	0,960	3,923
<i>UK_TRMM_60_Estable</i>	-1,836	4,836	0,164	0,977	3,482
<i>UK_TRMM_60_Esférico</i>	-1,927	4,855	0,181	0,967	3,838
<i>UK_TRMM_90_Estable</i>	-2,620	4,784	0,150	0,976	3,191
<i>UK_TRMM_90_Esférico</i>	-1,834	4,548	0,125	0,982	2,645
<i>UK_CLARA_30_Estable</i>	-1,640	4,114	0,152	0,824	3,232
<i>UK_CLARA_30_Esférico</i>	-1,668	4,258	0,171	0,858	3,624
<i>UK_CLARA_60_Estable</i>	-1,648	4,074	0,163	0,817	3,469
<i>UK_CLARA_60_Esférico</i>	-1,673	4,029	0,161	0,831	3,420
<i>UK_CLARA_90_Estable</i>	-1,629	4,133	0,186	0,863	3,955
<i>UK_CLARA_90_Esférico</i>	-1,665	4,353	0,187	0,905	3,967
<i>UK_DEM_30_Estable</i>	-1,881	4,647	0,153	0,972	3,240
<i>UK_DEM_30_Esférico</i>	-1,771	4,673	0,165	0,945	3,494
<i>UK_DEM_60_Estable</i>	-1,797	4,703	0,157	0,953	3,323
<i>UK_DEM_60_Esférico</i>	-1,770	4,652	0,165	0,945	3,501
<i>UK_DEM_90_Estable</i>	-1,935	4,595	0,170	0,955	3,612
<i>UK_DEM_90_Esférico</i>	-2,027	4,630	0,173	0,968	3,678

Para cada metodología (IDW, TPS, OK y UK), se seleccionaron aquellas combinaciones que, dentro de la metodología a la que pertenecieran, tuvieran los mejores desempeños en al menos uno de los estadísticos calculados. La Tabla 8 muestra las nueve combinaciones seleccionadas con sus estadísticos respectivos. Al realizar los promedios de cada error para cada una de las metodologías, OK y UK mostraron los mejores desempeños. Concretamente, OK obtuvo los mejores resultados para el MBE y el MBES; y UK, para el RMSE. IDW arrojó errores un poco mayores, aunque no muy alejados de los obtenidos con Kriging. TPS, por otra parte, arrojó los valores más altos en los tres estadísticos.

Los valores resaltados corresponden a los errores más pequeños por cada tipo de error: MBE, RMSE y MBES. Así, UK_TRMM_90_Esférico presenta los valores más bajos para el MBE y MBES, y UK_CLARA_60_Estable el menor RMSE. La metodología UK_CLARA_60_Estable arrojó un RMSE de 0,817 horas, equivalente a una desviación de aproximadamente 49 minutos de brillo solar, que se contrasta con valores cercanos a 60 minutos de desviación de brillo solar para las otras combinaciones, y presentó un MBE de 0,163 horas, que corresponde a un poco menos de 10 minutos de brillo solar. UK_TRMM_90_Esférico arrojó un RMSE de 0,982 horas, correspondiente a aproximadamente 59 minutos de brillo solar y un MBE de 0,125 horas, equivalente a un error de 7,5 minutos de brillo solar.

Tabla 8. Combinaciones de parámetros con los mejores resultados para el MBE, RMSE y MBE por metodología de interpolación para brillo solar. MBE y RMSE expresados en horas y MBES expresado como porcentaje.

Metodología	Min	Max	MBE	RMSE	MBES
<i>IDW_P2_Completo</i>	-1,961	4,711	0,169	0,986	3,590
<i>IDW_P1.5_Completo</i>	-1,936	4,545	0,157	0,984	3,335
<i>IDW_P1.5_Cuatro45°</i>	-2,018	4,413	0,144	0,988	3,066
<i>TPS_Completo</i>	-1,758	4,898	0,215	0,982	4,596
<i>TPS_Cuatro45°</i>	-2,828	5,088	0,180	1,029	3,814
<i>OK_Esférico_Cuatro45°</i>	-1,772	4,706	0,164	0,946	3,480
<i>OK_EfectoHoyo_Cuatro45°</i>	-1,769	4,499	0,154	0,955	3,261
<i>UK_TRMM_90_Esférico</i>	-1,834	4,548	0,125	0,982	2,645
<i>UK_CLARA_60_Estable</i>	-1,648	4,074	0,163	0,817	3,469

5.1.2.2 Análisis estadístico de residuales

Se realizó un análisis estadístico de los valores residuales obtenidos en el proceso de validación. Estos valores cuantifican la diferencia entre el valor predicho y el valor real de brillo solar en una localización determinada. Las Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19 presentan los histogramas de frecuencia calculados a partir de los residuales de los tres conjuntos de validación para cada una de las 42 combinaciones evaluadas en este estudio.

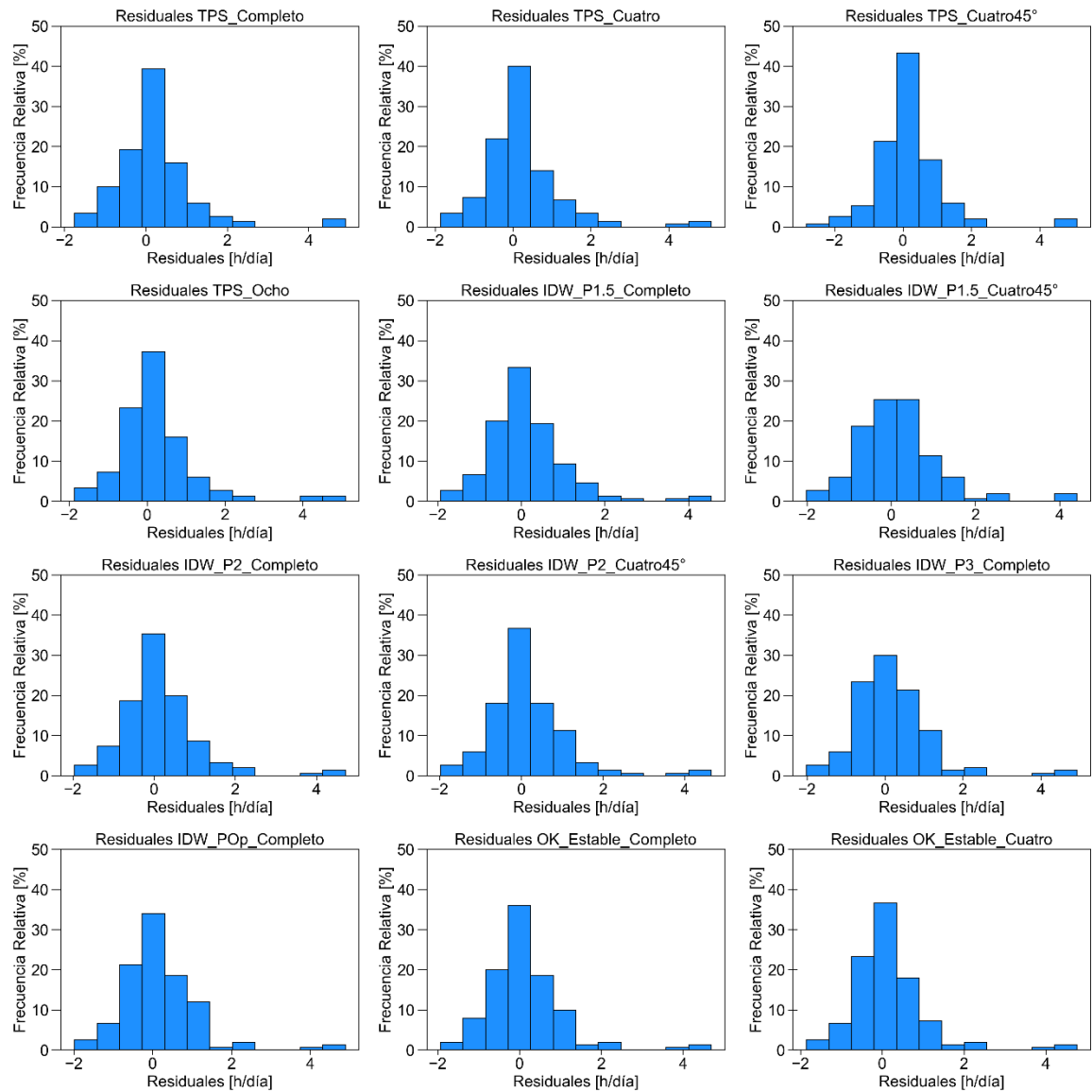


Figura 16. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones TPS_Completo, TPS_Cuatro, TPS_Cuatro45°, TPS_Ocho, IDW_P1.5_Completo, IDW_P1.5_Cuatro45°, IDW_P2_Completo, IDW_P2_Cuatro45°, IDW_P3_Completo, IDW_POp_Completo, OK_Estable_Completo y OK_Estable_Cuatro.

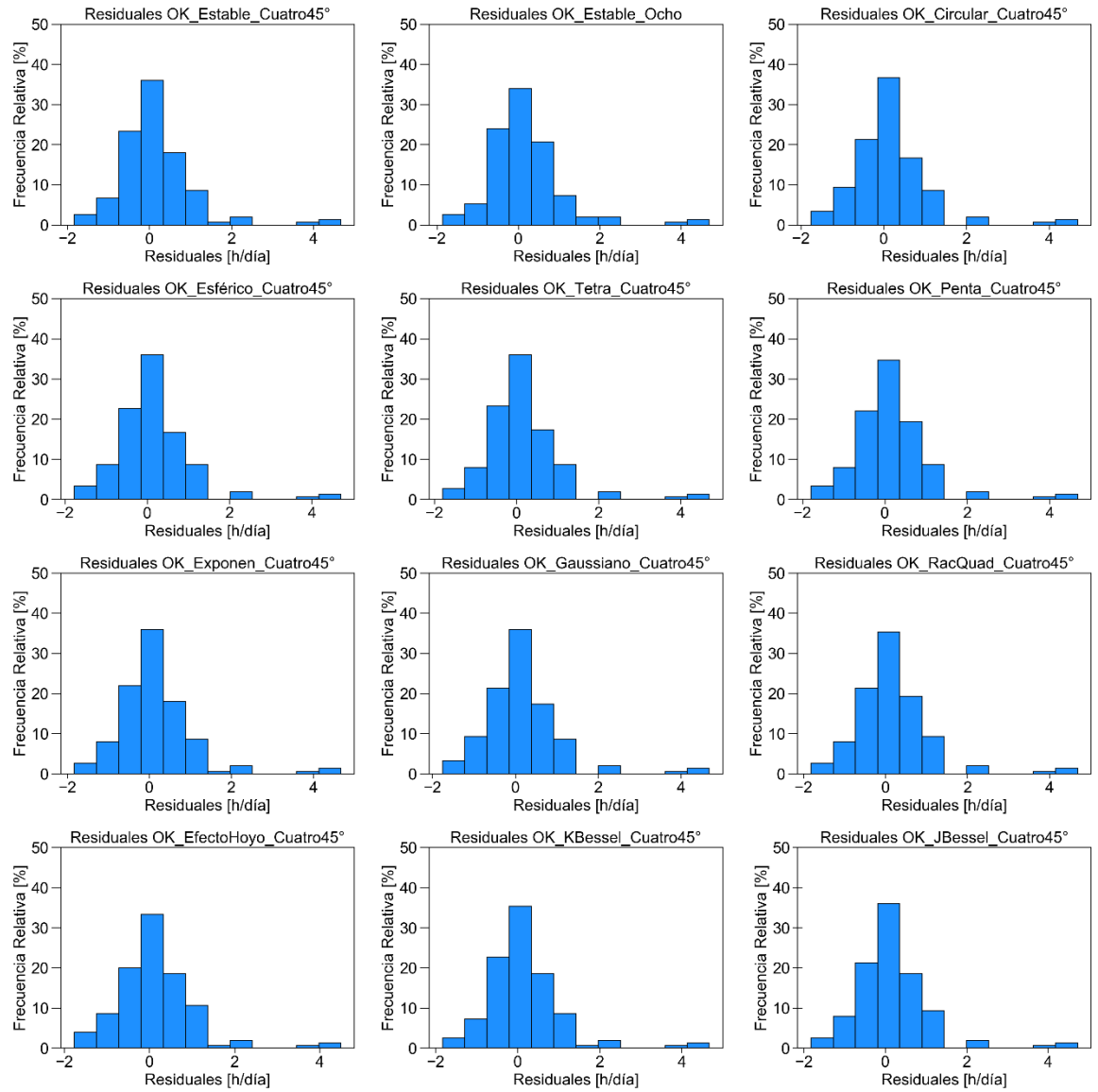


Figura 17. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones OK_Estable_Cuatro45°, OK_Estable_Ocho, OK_Circular_Cuatro45°, OK_Esférico_Cuatro45°, OK_Tetra_Cuatro45°, OK_Penta_Cuatro45°, OK_Exponen_Cuatro45°, OK_Gaussiano_Cuatro45°, OK_RacQuad_Cuatro45°, OK_EfectoHoyo_Cuatro45°, OK_KBessel_Cuatro45° y OK_JBessel_Cuatro45°.

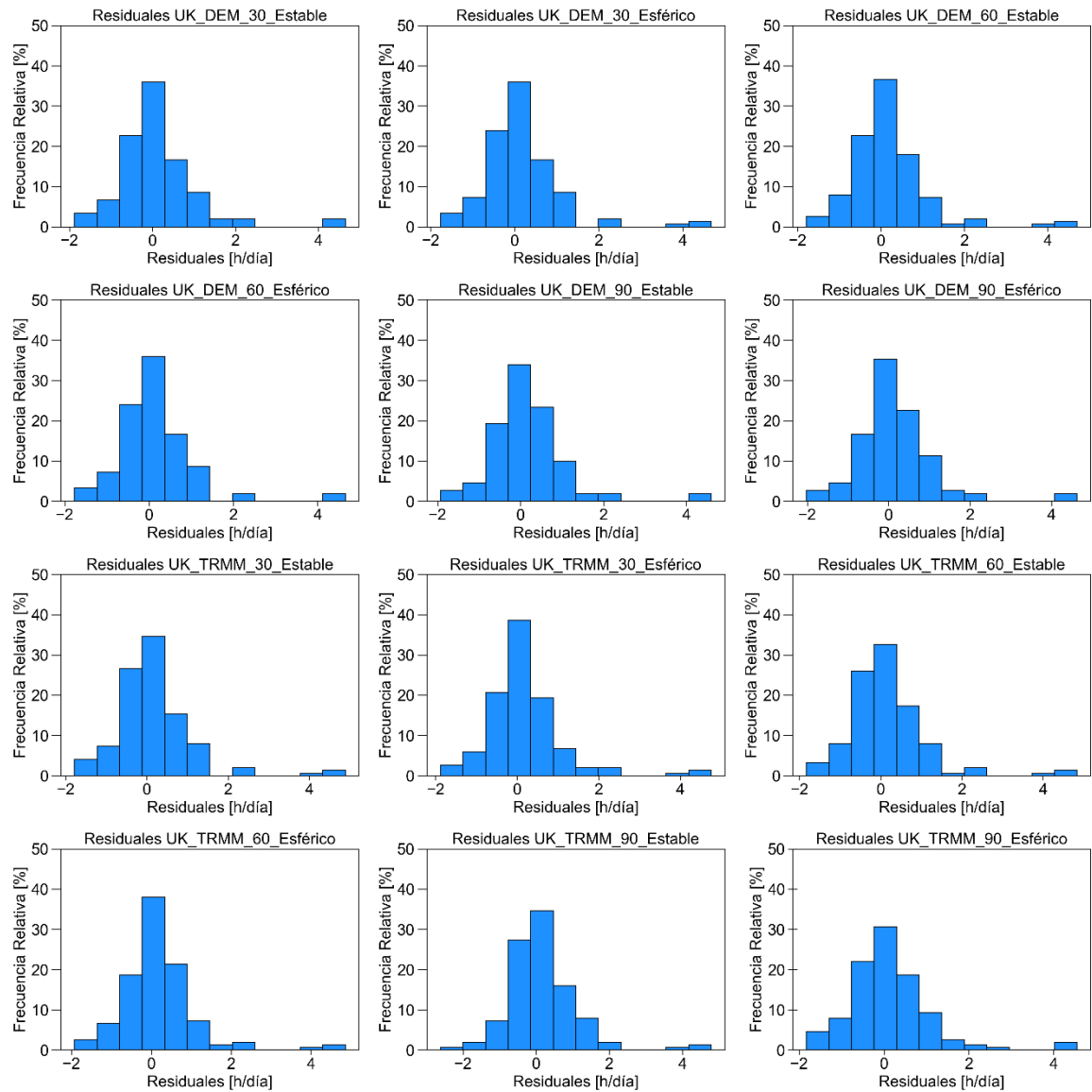


Figura 18. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones UK_DEM_30_Estable, UK_DEM_30_Esférico, UK_DEM_60_Estable, UK_DEM_60_Esférico, UK_DEM_90_Estable, UK_DEM_90_Esférico, UK_TRMM_30_Estable, UK_TRMM_30_Esférico, UK_TRMM_60_Estable, UK_TRMM_60_Esférico, UK_TRMM_90_Estable y UK_TRMM_90_Esférico.

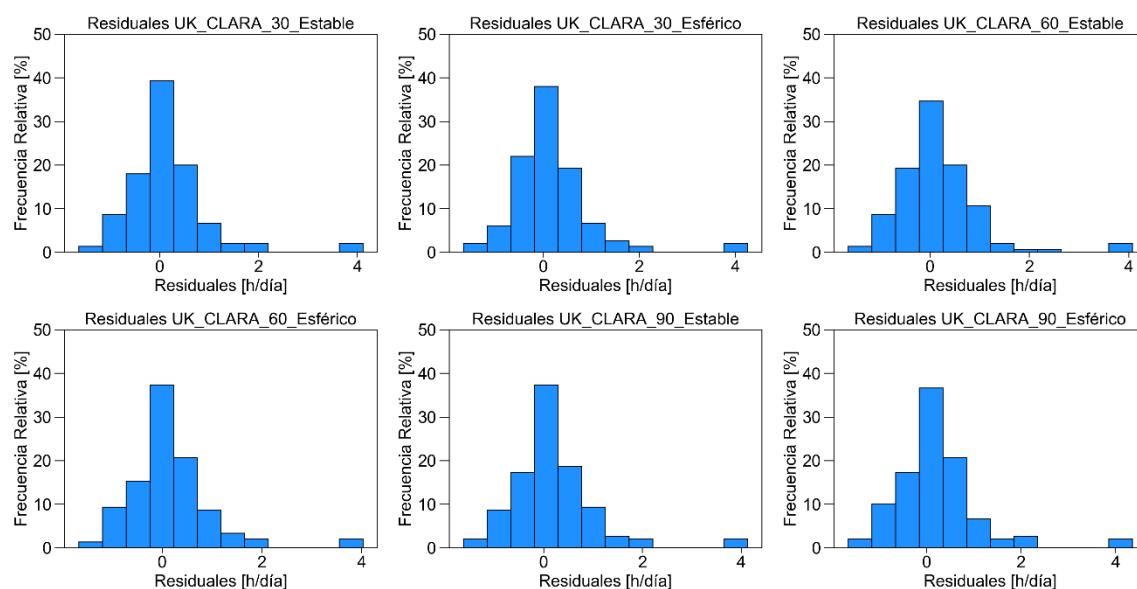


Figura 19. Histograma de frecuencia de los residuales de brillo solar para las combinaciones UK_CLARA_30_Estable, UK_CLARA_30_Esférico, UK_CLARA_60_Estable, UK_CLARA_60_Esférico, UK_CLARA_90_Estable y UK_CLARA_90_Esférico.

Se observa en la totalidad de histogramas que la distribución de los datos tiene un comportamiento gaussiano asimétrico, presentando una cola alargada hacia la derecha. Esta cola se extiende hasta valores residuales de alrededor de 4 horas de brillo solar, que indican una sobrestimación de la variable en estos puntos. Estos valores atípicos en la distribución representan altos errores de estimación, que pueden deberse a la falta de estaciones de medición en algunas zonas.

Las combinaciones que hacen uso de las metodologías IDW, TPS y OK presentan, en su mayoría, un rango de distribución que abarca valores de brillo solar subestimados de alrededor de 2 horas, y sobrestimados de alrededor de 4 horas. Las combinaciones de UK que emplean el flujo de radiación de onda corta como variable secundaria, parecen tener una distribución más acotada comparada con las demás combinaciones, lo cual indica que presentan los menores valores de desviación estándar. Las combinaciones de UK que emplean la elevación y la precipitación como variables secundarias presentan rangos de la distribución más amplios, similares a los descritos para IDW, TPS y OK.

La Tabla 9 muestra algunos estadísticos descriptivos robustos calculados a partir de los valores residuales, dentro de los cuales se encuentran la mediana, el coeficiente de asimetría, la curtosis y el rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en inglés). También se muestran otros estadísticos como la media, la desviación estándar, y los valores máximos y mínimos.

Tabla 9. Resumen de estadísticos calculados a partir de los residuales de brillo solar para las 42 combinaciones evaluadas.

	Media	Mediana	Desv.	Mín.	Máx.	Asimetría	Curtosis	IQR
<i>TPS_Completo</i>	0,215	0,065	0,962	-1,758	4,898	2,108	8,678	0,741

TPS_Cuatro	0,207	0,050	0,998	-1,866	5,087	2,017	8,020	0,847
TPS_Cuatro45°	0,180	0,041	1,017	-2,828	5,088	1,771	7,831	0,852
TPS_Ocho	0,224	0,053	1,035	-1,865	5,088	2,091	7,660	0,866
IDW_P1.5_Completo	0,157	0,066	0,975	-1,936	4,545	1,610	5,632	0,968
IDW_P1.5_Cuatro45°	0,144	0,055	0,981	-2,018	4,413	1,494	4,958	0,963
IDW_P2_Completo	0,169	0,099	0,975	-1,961	4,711	1,706	6,331	0,946
IDW_P2_Cuatro45°	0,155	0,063	0,980	-1,982	4,643	1,633	5,955	0,957
IDW_P3_Completo	0,189	0,127	0,987	-2,020	4,927	1,763	6,962	0,917
IDW_POp_Completo	0,185	0,121	0,981	-1,985	4,888	1,740	6,748	0,909
OK_Estable_Completo	0,165	0,055	0,957	-1,940	4,690	1,836	7,132	0,923
OK_Estable_Cuatro	0,172	0,070	0,953	-1,861	4,766	1,981	7,958	0,796
OK_Estable_Cuatro45°	0,160	0,078	0,943	-1,837	4,669	1,856	7,368	0,841
OK_Estable_Ocho	0,178	0,088	0,950	-1,862	4,690	1,861	7,419	0,873
OK_Circular_Cuatro45°	0,161	0,067	0,936	-1,759	4,684	1,943	7,644	0,859
OK_Esférico_Cuatro45°	0,164	0,062	0,935	-1,772	4,706	1,937	7,720	0,884
OK_Tetra_Cuatro45°	0,162	0,062	0,937	-1,801	4,697	1,917	7,673	0,903
OK_Penta_Cuatro45°	0,162	0,073	0,938	-1,794	4,675	1,896	7,564	0,862
OK_Exponen_Cuatro45°	0,160	0,072	0,942	-1,832	4,674	1,863	7,389	0,809
OK_Gaussiano_Cuatro45°	0,158	0,067	0,938	-1,756	4,679	1,927	7,564	0,872
OK_RacQuad_Cuatro45°	0,172	0,051	0,945	-1,822	4,686	1,879	7,515	0,851
OK_EfectoHoyo_Cuatro45°	0,154	0,056	0,946	-1,769	4,499	1,680	6,151	0,890
OK_KBessel_Cuatro45°	0,161	0,077	0,942	-1,834	4,670	1,857	7,403	0,842
OK_JBessel_Cuatro45°	0,167	0,091	0,942	-1,831	4,722	1,863	7,499	0,926
UK_DEM_30_Estable	0,153	0,056	0,963	-1,881	4,647	1,862	7,177	0,831
UK_DEM_30_Esférico	0,165	0,058	0,934	-1,771	4,673	1,949	7,714	0,880
UK_DEM_60_Estable	0,157	0,064	0,943	-1,797	4,703	1,879	7,393	0,849
UK_DEM_60_Esférico	0,165	0,055	0,934	-1,770	4,652	1,957	7,716	0,874
UK_DEM_90_Estable	0,170	0,064	0,943	-1,935	4,595	1,798	7,070	0,857
UK_DEM_90_Esférico	0,173	0,085	0,955	-2,027	4,630	1,799	7,151	0,895
UK_TRMM_30_Estable	0,163	0,058	0,954	-1,783	4,881	2,029	8,183	0,832
UK_TRMM_30_Esférico	0,185	0,112	0,945	-1,888	4,759	1,959	8,025	0,853
UK_TRMM_60_Estable	0,164	0,045	0,966	-1,836	4,836	1,837	7,124	0,870
UK_TRMM_60_Esférico	0,181	0,082	0,953	-1,927	4,855	1,954	7,965	0,816
UK_TRMM_90_Estable	0,150	0,063	0,968	-2,620	4,784	1,774	7,628	0,858
UK_TRMM_90_Esférico	0,125	0,055	0,978	-1,834	4,548	1,672	6,027	0,905
UK_CLARA_30_Estable	0,152	0,030	0,813	-1,640	4,114	2,108	8,110	0,753
UK_CLARA_30_Esférico	0,171	0,070	0,843	-1,668	4,258	2,150	8,543	0,824
UK_CLARA_60_Estable	0,163	0,065	0,803	-1,648	4,074	2,056	7,769	0,677
UK_CLARA_60_Esférico	0,161	0,074	0,818	-1,673	4,029	1,992	7,419	0,724
UK_CLARA_90_Estable	0,186	0,090	0,846	-1,629	4,133	2,008	7,583	0,682
UK_CLARA_90_Esférico	0,187	0,081	0,888	-1,665	4,353	1,901	7,048	0,850

Se construyó un Diagrama de Caja y Bigote a partir de los valores residuales de las nueve combinaciones que mejor resultado presentaron en la etapa de validación. Este diagrama se muestra en la Figura 20.

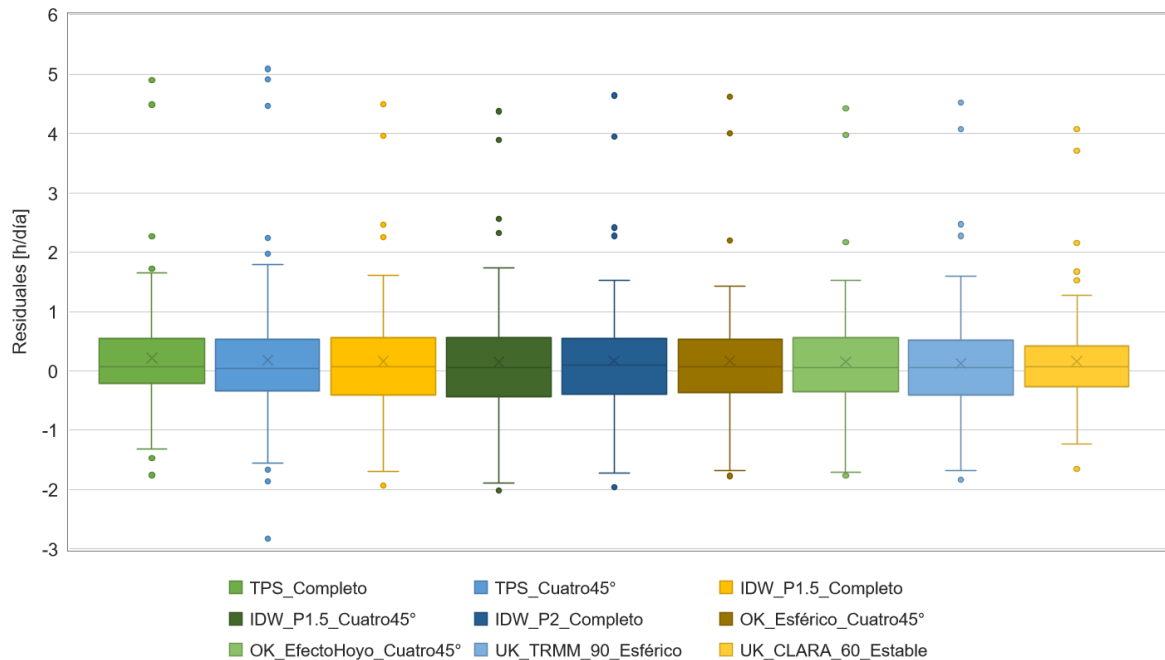


Figura 20. Diagrama de Caja y Bigote para los residuales de brillo solar de las nueve combinaciones seleccionadas.

Se observa una significativa cantidad de valores atípicos en todas las combinaciones, que superan en más de 1,5 veces o incluso 3 veces su valor del IQR. Estos corresponden, en su mayoría, a valores positivos que indican una sobrestimación de la variable en esos puntos de hasta 5 horas en la combinación TPS_Cuatro45°. Se presentan también valores atípicos negativos, pero en menor cantidad y magnitud. Los valores de la media y la mediana para las combinaciones TPS_Completo y TPS_Cuatro45° presentan las mayores diferencias, lo cual es un indicativo de la asimetría de sus distribuciones.

La combinación UK_CLARA_60_Estable presenta el menor valor del IQR, es decir, la menor diferencia entre el primer y el tercer cuartil de la distribución. Asimismo, sus valores atípicos positivos y negativos más extremos son los que se encuentran más cercanos al centro de la distribución. Lo anterior indica que esta combinación tiene una baja dispersión de los datos en comparación con las demás combinaciones. Estos resultados son consistentes con los resultados obtenidos anteriormente, en los cuales esta combinación presentó el mejor desempeño en el estadístico RMSE.

5.1.2.3 Variogramas

Al ejecutar las interpolaciones de brillo solar para las combinaciones que hacen uso de Kriging se generaron los variogramas omnidireccionales sin incluir anisotropía, para los cuales se ajustó y optimizó una curva asociada a un modelo definido en cada una de estas combinaciones. Las Figura 21 muestra los variogramas para las combinaciones

OK_Esférico_Cuatro45°, OK_EfectoHoyo_Cuatro45°, UK_TRMM_90_Esférico y UK_CLARA_60_Estable, respectivamente.

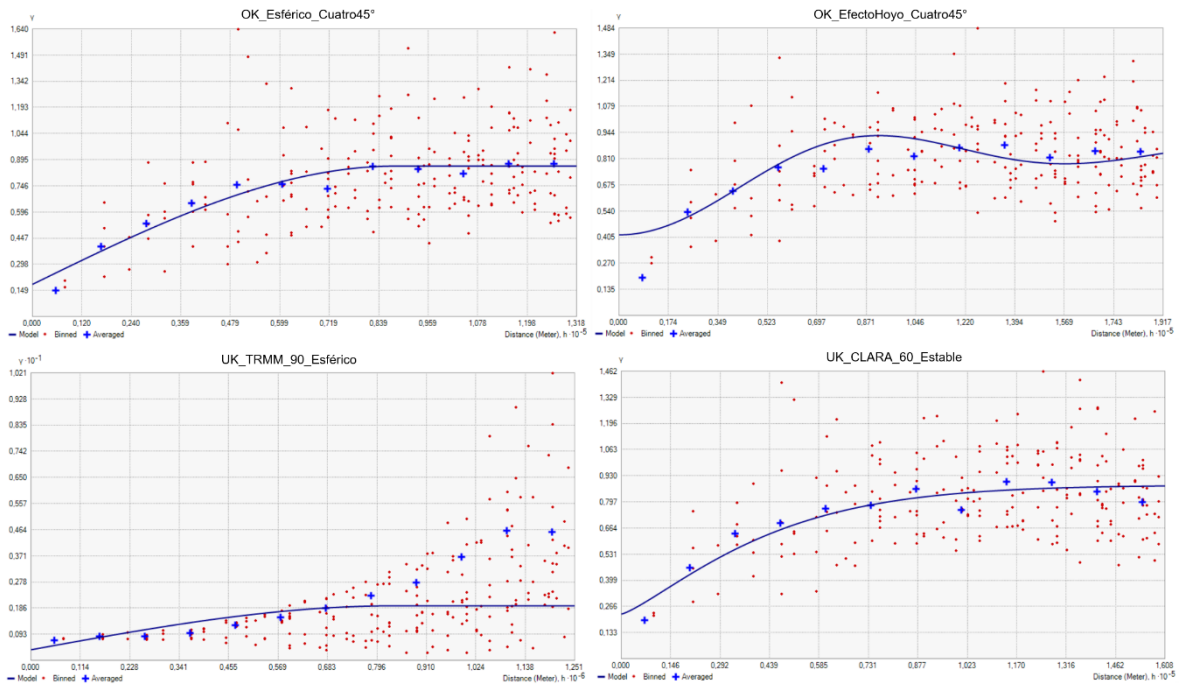


Figura 21. Curvas ajustadas y optimizadas para el variograma de las combinaciones OK_Esférico_Cuatro45° (izquierda arriba), OK_EfectoHoyo_Cuatro45° (derecha arriba), UK_TRMM_90_Esférico (izquierda abajo) y UK_CLARA_60_Estable (derecha abajo).

Se observan las diferentes curvas ajustadas a los semivariogramas, que corresponden a los modelos Esférico, Efecto de Hoyo y Estable. Las combinaciones OK_Esférico_Cuatro45° y UK_CLARA_60_Estable presentan los mejores ajustes, al tener una curva que se acerca a los valores promedio (cruces azules). Las combinaciones OK_EfectoHoyo_Cuatro45° y UK_TRMM_90_Esférico, por el contrario, no presentan un buen ajuste, por lo que puede haber mayores problemas en sus estimaciones.

5.1.2.4 Mapas anuales

Los mapas generados con los 276 valores anuales de brillo solar para las nueve combinaciones se muestran en la Figura 22. En los tres mapas con IDW, se evidencian patrones circulares irregulares comunes en esta metodología alrededor de algunas estaciones de brillo solar. Estos patrones son más evidentes en las zonas donde hay mayor densidad de estaciones, correspondientes a la región de los Andes y el Caribe, principalmente. Con respecto a los parámetros evaluados, el valor de potencia 1,5 genera una superficie más suavizada con respecto a una potencia de 2, homogeneizando algunas zonas que presentan grandes cambios de brillo solar. El efecto del tipo de sector de búsqueda Cuatro 45° parece suavizar aún más la superficie con respecto al Completo.

En los mapas generados con TPS se observa una alta variabilidad en la distribución de brillo solar, evidenciándose cambios muy abruptos en distancias muy cortas, que coinciden en cierta manera con el relieve colombiano. Se pueden identificar tramos discontinuos de

las cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta. Además, TPS parece generar superficies circulares en las zonas con mayor variabilidad de brillo solar, que no reflejan el comportamiento espacial esperado de esta variable. En comparación con las demás metodologías, TPS presenta los valores de brillo solar más altos y bajos en los mapas generados, debido a que la superficie Kernel ajustada puede salirse del rango de los valores medidos en tierra para efectos de suavización. Con respecto al tipo de sector de búsqueda, este parámetro no parece tener una influencia significativa en los campos generados con TPS.

En la metodología OK, por otra parte, sus superficies se encuentran más suavizadas con respecto a TPS, pero muestra más elementos orográficos que aquellas con IDW. Sin embargo, no alcanza a reflejar de una forma importante el relieve colombiano. Los resultados con los tipos de modelo Esférico y Efecto de Hoyo del variograma, no parecen presentar diferencias.

Para las interpolaciones con UK, UK_TRMM_90_Esférico generó una superficie completamente suavizada, en la cual es difícil identificar los elementos más importantes del relieve colombiano. Este efecto se pudo haber generado por el valor 90 del ESTA. UK_CLARA_60_Estable, por otra parte, exhibe un comportamiento espacial del brillo solar relacionado con el DEM para Colombia, distinguiéndose fácilmente las tres cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta. Además, se pueden identificar patrones de nubosidad de largo plazo propios de cada región climática. El Pacífico, presentando valores bajos debido a la Corriente de Chorro del Chocó principalmente; los Andes, presentando una dinámica diferenciada entre las cordilleras y los valles interandinos, en donde las primeras presentan una alta nubosidad y los segundos, un ciclo marcado por diferentes corrientes que arrastran humedad desde diferentes lugares de Colombia; la región Caribe, con marcada ausencia de nubosidad; y la región Orinoco-Amazonía, con una cobertura importante de nubes.

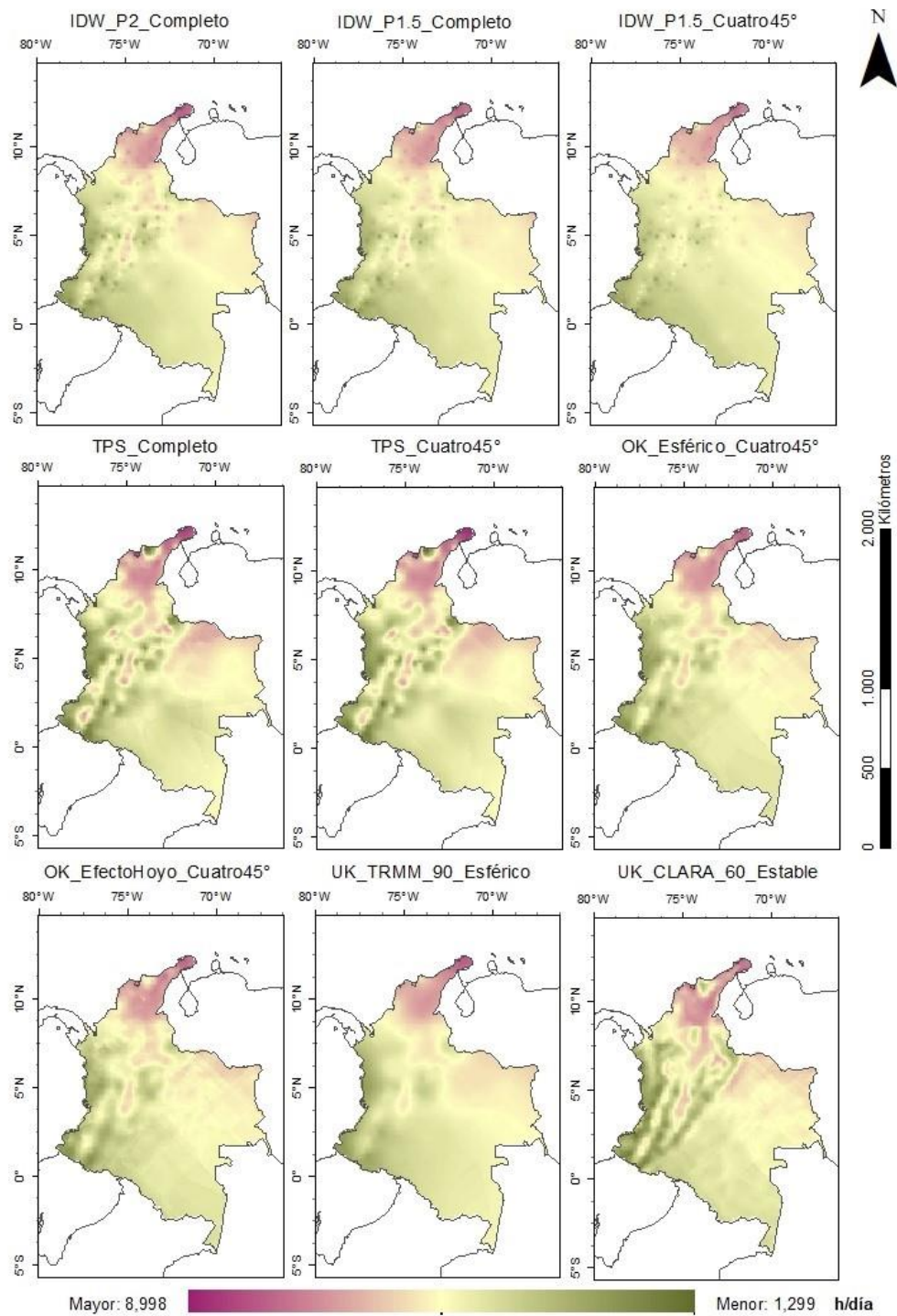


Figura 22. Mapas interpolados anuales de brillo solar medido en horas por día (h/día) para las nueve combinaciones de parámetros seleccionadas.

5.2 IRRADIACIÓN

5.2.1 Presentación de resultados

5.2.1.1 Estadísticos de validación

En la Tabla 10 se presentan los constantes empíricas a y b para cada región, calculados a partir de la aplicación de las ecuaciones del modelo Ångström-Prescott y el ajuste para las regiones Pacífico y Caribe.

Los valores de a corresponden al intercepto de la línea de tendencia de cada región con el eje Y. Entre mayor sea el valor de a , los valores de la relación entre H/H_0 serán mayores; es decir, que el valor de radiación solar que llega a la superficie se acerca más a la radiación extraterrestre. La región Caribe presenta el mayor valor de a , seguida por Andes, Orinoco-Amazonía y Pacífico, respectivamente. El parámetro b corresponde a la pendiente, que indica la inclinación de la línea con respecto al eje X. Entre mayor sea su valor, las relaciones H/H_0 tendrán unas variaciones mayores entre ellas; si es más pequeña, en cambio, los valores se moverán en un rango menos amplio. Los mayores valores de b los presenta la región Orinoco-Amazonía, seguida por Andes, Pacífico y Caribe, respectivamente.

Tabla 10. Constantes empíricas a y b calculadas a partir de las regresiones lineales entre H/H_0 y n/N

Región	a	b
<i>Andes</i>	0,310	0,343
<i>Pacífico</i>	0,299	0,329
<i>Orinoco-Amazonía</i>	0,301	0,347
<i>Caribe</i>	0,325	0,328

Luego de aplicar el modelo Ångström-Prescott a partir de las constantes a y b , y los mapas de H_0 y N , se generaron mapas anuales de irradiación que posteriormente se validaron con las 17 estaciones de irradiación del IDEAM. Los resultados de la validación se presentan en la Tabla 11 en donde, para cada una de las nueve combinaciones de las metodologías seleccionadas, se calcularon los mínimos y máximos de la diferencia entre los valores predichos y reales, y los errores MBE, RMSE y MBES. Los valores resaltados corresponden a aquellos más bajos para cada estadístico.

Tabla 11. Combinaciones de parámetros con los mejores resultados para el MBE, RMSE y MBES por metodología de interpolación para la irradiación. MBE y RMSE expresados en kWh/m² y MBES expresado como porcentaje.

Combinaciones	Min	Max	MBE	RMSE	MBES
<i>IDW_P2_Completo</i>	-0,404	1,500	0,217	0,473	5,033
<i>IDW_P1.5_Completo</i>	-0,405	1,494	0,204	0,473	4,735
<i>IDW_P1.5_Cuatro45°</i>	-0,368	1,518	0,199	0,486	4,621
<i>TPS_Completo</i>	-0,456	1,430	0,198	0,477	4,594

<i>TPS_Cuatro45°</i>	-0,476	1,415	0,179	0,465	4,153
<i>OK_Esférico_Cuatro45°</i>	-0,451	1,462	0,139	0,463	3,230
<i>OK_EfectoHoyo_Cuatro45°</i>	-0,470	1,484	0,127	0,469	2,941
<i>UK_TRMM_90_Esférico</i>	-0,410	1,517	0,172	0,484	4,003
<i>UK_CLARA_60_Estable</i>	-0,505	1,307	0,146	0,434	3,380

Promediando los resultados de cada uno de los errores por metodología, OK y UK presentaron los mejores desempeños en comparación con IDW y TPS, cuyos valores fueron más elevados. Las combinaciones con TPS, en general, presentaron unos menores valores con respecto a IDW; siendo esta última la metodología con los errores más altos.

OK_EfectoHoyo_Cuatro45° y UK_CLARA_60_Estable fueron las combinaciones con los mejores resultados. OK_EfectoHoyo_Cuatro45° presentó los MBE y MBES más bajos, correspondientes a 0,127 kWh/m² y 2,9%, respectivamente. El RMSE más bajo lo presentó UK_CLARA_60_Estable con un valor de 0,434 kWh/m². A diferencia de las validaciones realizadas para los mapas de brillo solar, los errores para UK_TRMM_90_Esférico fueron significativamente mayores comparados con las otras combinaciones de Kriging.

5.2.2 Análisis estadístico de residuales

De la misma forma que para brillo solar, se realizó un análisis estadístico de los valores residuales obtenidos en el proceso de validación de los mapas de irradiación. La Figura 23 muestra los histogramas de frecuencia calculados a partir de los valores residuales de las 17 estaciones de validación para cada una de las nueve combinaciones seleccionadas.

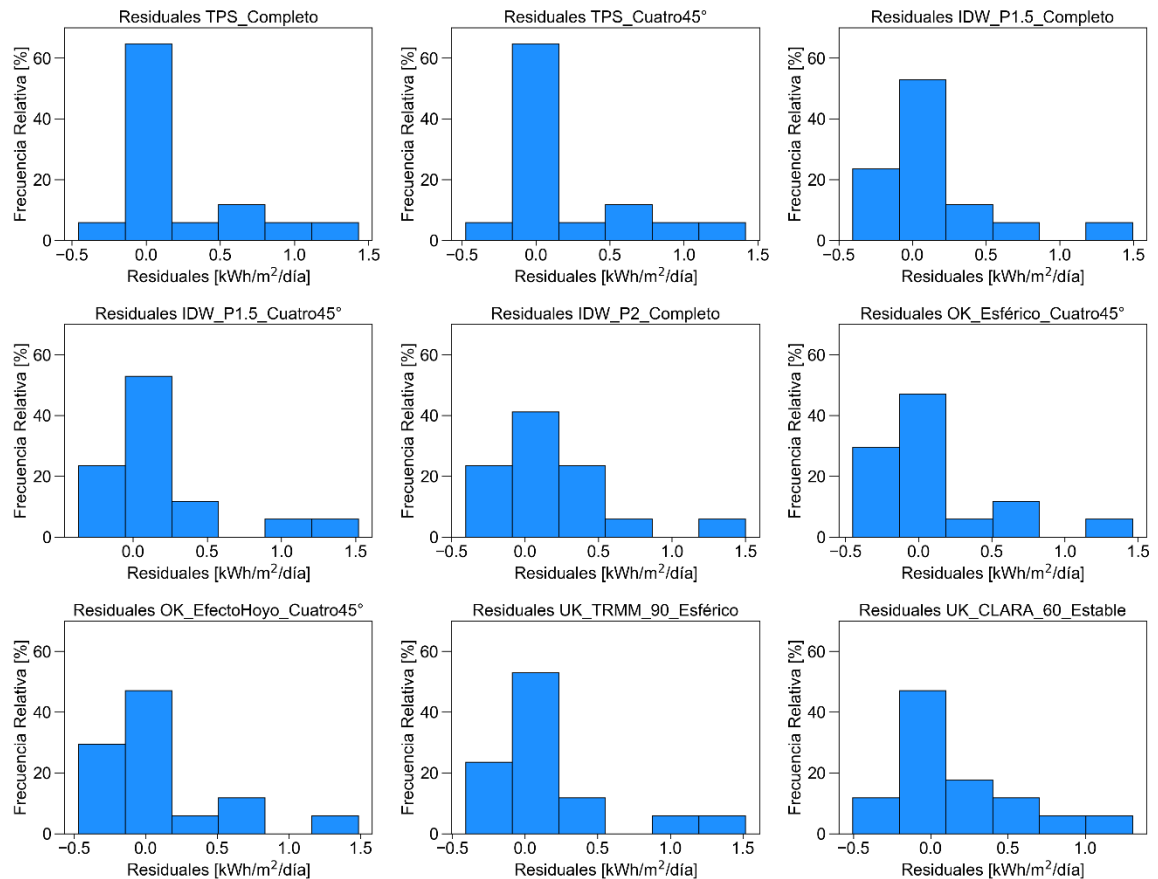


Figura 23. Histograma de frecuencia de los residuos de irradiación para las nueve combinaciones seleccionadas.

La distribución de los valores residuales de brillo solar presenta un comportamiento presuntamente gaussiano en las combinaciones de IDW y kriging. Se muestra además que estas distribuciones presentan asimetría con una cola alargada hacia la derecha. Aquellas que emplean TPS no parecen presentar una distribución de tipo gaussiana. Sin embargo, debido a la baja cantidad de estaciones de validación de irradiación, no pueden obtenerse conclusiones importantes sobre la distribución de estos residuos a partir de los histogramas presentados.

La Tabla 12 muestra los estadísticos calculados a partir de los valores residuales de irradiación.

Tabla 12. Resumen de estadísticos calculados a partir de los residuos de irradiación para las nueve combinaciones seleccionadas.

	Media	Mediana	Desv.	Mín.	Máx.	Asimetría	Curtosis	IQR
<i>TPS_Completo</i>	0,198	0,091	0,447	-0,456	1,430	1,490	2,735	0,401
<i>TPS_Cuatro45°</i>	0,179	0,084	0,443	-0,476	1,415	1,588	3,107	0,217
<i>IDW_P1.5_Completo</i>	0,204	0,116	0,440	-0,405	1,494	1,727	3,995	0,202

<i>IDW_P1.5_Cuatro45°</i>	0,199	0,088	0,457	-0,368	1,518	1,720	3,570	0,249
<i>IDW_P2_Completo</i>	0,217	0,131	0,433	-0,404	1,500	1,744	4,250	0,242
<i>OK_Esférico_Cuatro45°</i>	0,139	0,041	0,455	-0,451	1,462	1,686	3,688	0,318
<i>OK_EfectoHoyo_Cuatro45°</i>	0,127	0,048	0,466	-0,470	1,484	1,662	3,722	0,336
<i>UK_TRMM_90_Esférico</i>	0,172	0,111	0,466	-0,410	1,517	1,671	3,631	0,228
<i>UK_CLARA_60_Estable</i>	0,146	0,086	0,421	-0,505	1,307	1,373	2,791	0,220

Se construyó un Diagrama de Caja y Bigote a partir de los valores residuales de irradiación de las nueve combinaciones que mejor resultado presentaron en la etapa de validación. El diagrama se muestra en la Figura 24.

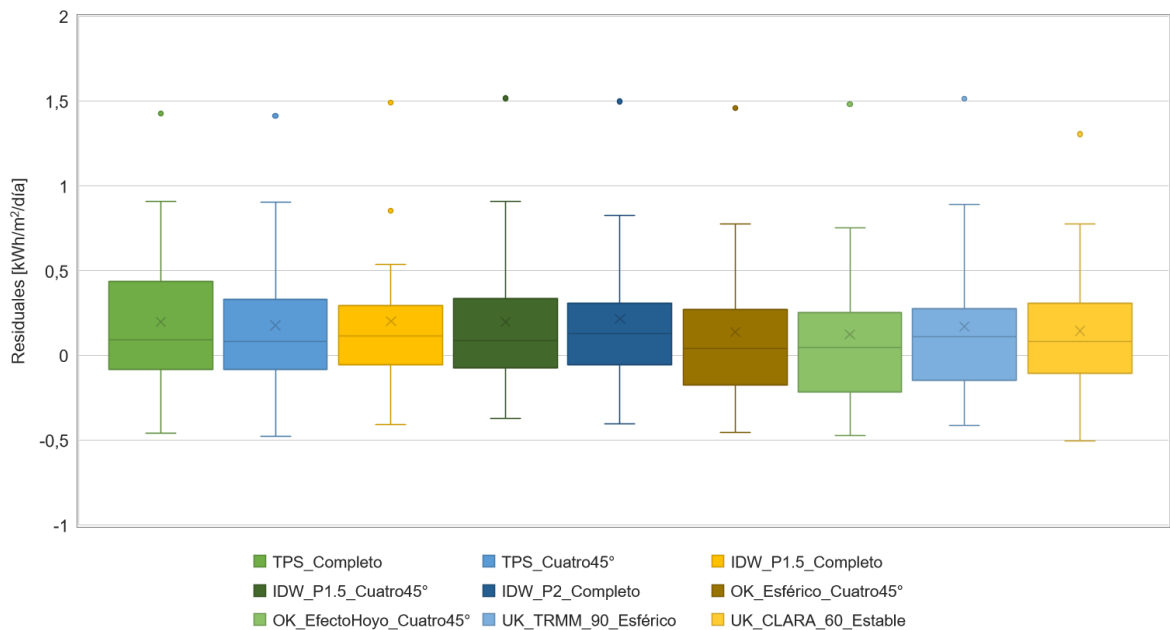


Figura 24. Diagrama de Caja y Bigote para los residuales de irradiación de las nueve combinaciones seleccionadas.

Se presentan valores residuales atípicos positivos de alrededor de 1,5 kWh/m² en las nueve combinaciones. La combinación IDW_P1.5_Completo es la que tiene el menor valor del IQR. Las combinaciones con UK presentan también valores bajos del IQR. UK_CLARA_60_Estable presenta el menor valor atípico más extremo, lo que nuevamente puede aportar información sobre su buen desempeño sobre otras combinaciones.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, contar con solo 17 valores residuales para cada combinación no es suficiente para describir de una forma adecuada el real comportamiento de estos valores a lo largo de toda la región de estudio. Para llevar a cabo un análisis estadístico más significativo de estos valores, se requieren más estaciones de validación.

5.2.2.1 Mapas anuales

Los mapas anuales de irradiación generados se muestran en la Figura 25. Los campos generados presentan el mismo comportamiento que aquellos para el brillo solar; sin embargo, la delimitación de las regiones climáticas se evidencia como una diferencia en los rangos entre los que se encuentran los valores de irradiación de una región a otra, producto de la aplicación del modelo Angström-Prescott de forma separada para cada una de ellas. El mapa generado por UK_CLARA_60_Estable muestra el mejor desempeño dentro de los mapas anuales de brillo solar para las nueve combinaciones, presentando los principales elementos del relieve colombiano anteriormente mencionados y el comportamiento climático esperado para cada una de las regiones. Estos resultados son consistentes con estudios pasados de sobre la climatología colombiana (algunos de ellos discutidos anteriormente), debido a que se preservan los rasgos más característicos de cada una de las regiones en relación a sus regímenes de precipitación y sus patrones de nubosidad de largo plazo, que terminan modulando la radiación que llega a la superficie.

Adicionalmente, en el campo generado por UK_CLARA_60_Estable, las regiones delimitadas se logran integrar de manera que no se presenten cambios abruptos en los valores de irradiación al pasar de una región a otra, hecho que no sucede en los mapas generados por IDW y OK.

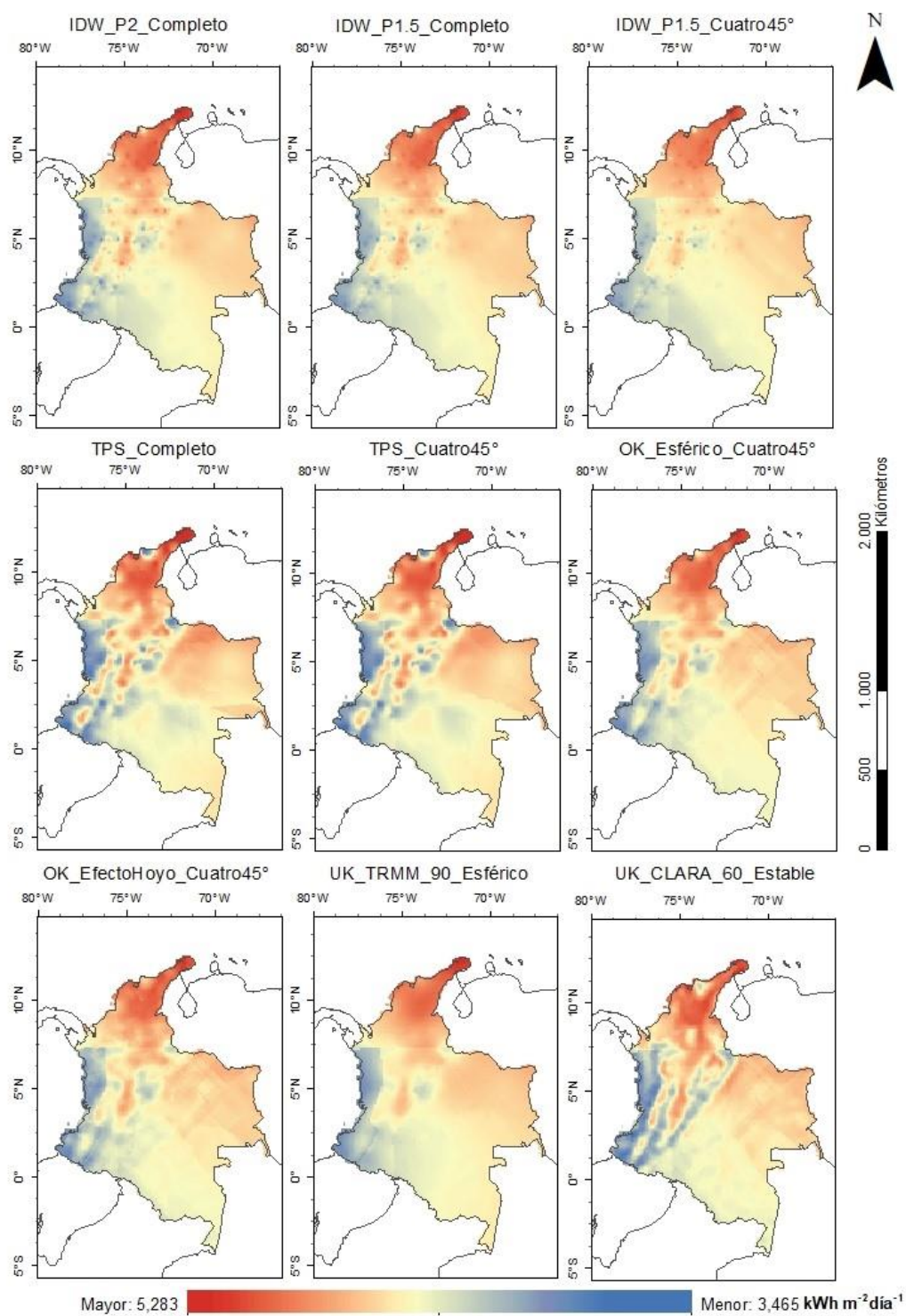


Figura 25. Mapas anuales de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) para las nueve combinaciones de parámetros seleccionadas.

5.3 ELECCIÓN DE LA MEJOR METODOLOGÍA DE INTERPOLACIÓN

Se seleccionó la metodología UK_CLARA_60_Estable como la que mejor desempeño presentó en este estudio. Aunque no posee los errores MBE y MBES más bajos, tiene una diferencia de 2,3 minutos de MBE con UK_TRMM_90_Esférico, que arrojó el valor más bajo, y un MBES de 3,4%, considerado como un valor adecuado en este tipo de estudios. Además, mostró el RMSE más bajo con una diferencia de casi 10 minutos con respecto al valor de UK_TRMM_90_Esférico. Esto implica que, aunque el valor medio de la distribución de los datos se desvía por 2,3 minutos, el rango en el cual se distribuyen los mismos es más cercano a la media.

Por otra parte, UK_CLARA_60_Estable generó como resultado un mapa en el cual se pudieron identificar elementos clave del relieve colombiano que terminan modulando los comportamientos climáticos en una escala más local, y pudo demostrar ser congruente con estudios pasados de la climatología colombiana, que fueron usados como referencias en este estudio. Lo anterior demuestra que la interpolación de brillo solar con UK, usando información secundaria del CLARA-A1 y los parámetros definidos, presenta resultados satisfactorios para Colombia, que no fueron alcanzados por las otras 41 combinaciones de las metodologías evaluadas.

La Figura 26 muestra un mapa de error estándar generado por ArcMap a partir de la capa geoestadística de la interpolación de brillo solar con UK_CLARA_60_Estable. Se observa que los errores estándar tienen un rango de 0,272 a 0,885 horas de luz solar. Los errores más altos se encuentran en las zonas con baja densidad de estaciones, correspondientes principalmente a gran parte del área de la región Orinoco-Amazonía y a zonas más pequeñas como el norte y suroeste de la región Caribe, el norte de la región Pacífico y el sur de los Andes. En contraste, la zona con los menores errores abarca casi toda el área de los Andes, al ser aquella región con la mayor densidad poblacional del país.

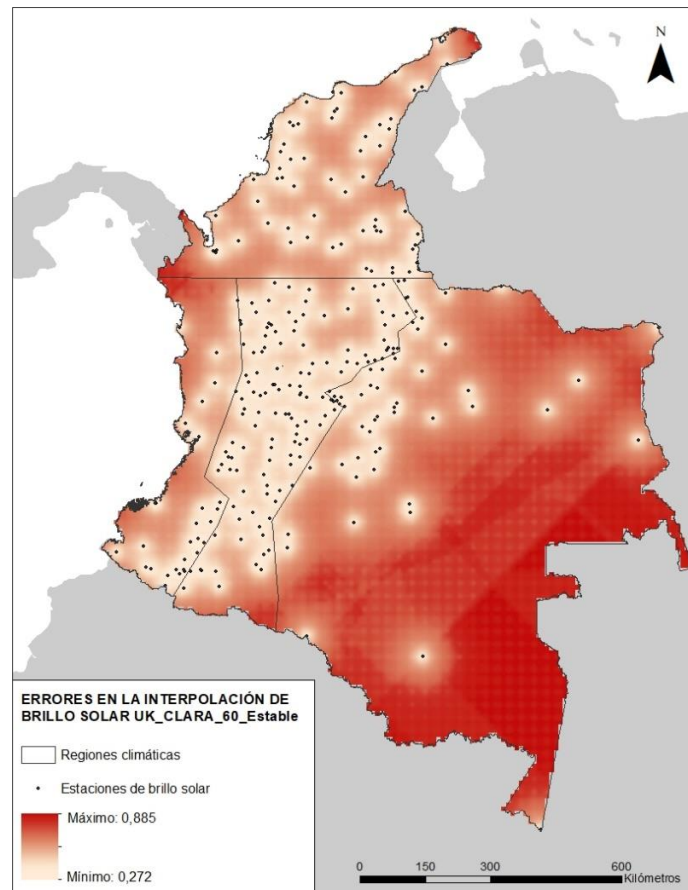


Figura 26. Mapa de error estándar de la interpolación de brillo solar con UK_CLARA_60_Estable realizada con los valores anuales de las 276 estaciones de brillo solar.

6 INTERPOLACIONES MENSUALES DE BRILLO SOLAR E IRRADIACIÓN

El alcance inicial de este estudio se definió hasta la generación de los mapas anuales de brillo solar e irradiación para Colombia, expuestos en el capítulo anterior, con las metodologías que presentaran los mejores resultados. No obstante, se generaron mapas de brillo solar e irradiación usando una metodología similar al análisis anual pero esta vez, a una escala mensual, y haciendo uso de la información recolectada y generada en los capítulos anteriores. A continuación, se describe la metodología seguida para lograr este objetivo.

Para el análisis mensual de brillo solar, se ejecutaron nuevamente las interpolaciones usando la combinación UK_CLARA_60_Estable para cada uno de los meses del año. Esta combinación emplea la metodología de interpolación UK, el mapa de flujo de radiación de onda corta del producto SIS como variable secundaria, un valor de 60 del ESTA y el tipo de modelo Estable ajustado al variograma. Al igual que para las interpolaciones de brillo solar anuales, se usó un variograma omnidireccional y no se incluyó anisotropía. Los demás parámetros modificables en ArcMap asociados a la metodología se mantuvieron por defecto.

Como información primaria, se usaron los valores promedio mensuales de brillo solar diario provenientes del conjunto de datos de las 276 estaciones seleccionadas, pero descartando las estaciones con datos faltantes para un mes determinado. Como información secundaria, se usaron 12 mapas del producto SIS del conjunto de datos CLARA-A1, los cuales fueron agregados mensualmente. Así, por ejemplo, para generar el mapa de brillo solar para el mes de enero, se usaron los valores mensuales de brillo solar del mes uno y el GEOTIFF del SIS correspondiente al mes de enero.

Luego de obtener los mapas mensuales de brillo solar, se convirtieron los valores de brillo solar en irradiación usando el modelo Ångström-Prescott con el objetivo de obtener mapas mensuales de irradiación. Como un primer paso, se recolectó información de brillo solar e irradiación de 26 estaciones del IDEAM que tuvieran ambos registros a una resolución temporal diaria. Estas estaciones se presentan en el Anexo 8 junto con sus coordenadas de localización. Luego, se realizó el mismo procedimiento descrito en el Cálculo de parámetros, para encontrar los valores de H_0 y N del modelo Ångström-Prescott asociados a cada uno de los registros diarios. Se construyeron entonces 12 regresiones lineales correspondientes a los meses del año para cada una de las regiones de estudio, a partir de las relaciones de H/H_0 y n/N . Las constantes a y b se obtuvieron a partir de las ecuaciones al ajustar una tendencia lineal a las regresiones, y se realizó un ajuste a los valores de a y b de todos los meses para las regiones Pacífico y Caribe. Las constantes para la región Caribe fueron ajustados promediando sus valores con los de las regiones de los Andes y Caribe del mes correspondiente, y las del Caribe se ajustaron con el promedio de sus constantes y las de la región de los Andes para el mes correspondiente.

Posteriormente, se dio paso a la aplicación de la ecuación Ångström-Prescott para encontrar valores de irradiación. Como información de entrada se usaron las constantes a y b de cada mes para cada una de las cuatro regiones, y los 12 mapas de H_0 y N a una

escala mensual. Como resultado, se generaron 12 mapas de irradiación expresada en kWh/m²/día para cada uno de los meses del año.

Finalmente, a partir de los mapas generados, se extrajeron los valores de irradiación en los municipios que son capitales de los departamentos de Colombia. Con los valores extraídos, se construyeron los ciclos anuales de radiación solar para cada uno de los municipios, agrupados en las cuatro regiones de estudio. En total se analizaron 30 municipios cuyos ciclos se compararon con los ciclos anuales de brillo solar para las regiones anteriormente expuestos.

6.1 BRILLO SOLAR

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los campos mensuales de brillo solar generados y de otros análisis adicionales.

6.1.1 Variogramas

Al igual que para las interpolaciones anuales de brillo solar, las interpolaciones mensuales se realizaron con el variograma omnidireccional y sin incluir anisotropía. Las Figuras Figura 27 y Figura 28 presentan los variogramas generados para cada uno de los meses del año, a los cuales se les ajustó y optimizó la curva del modelo Estable.

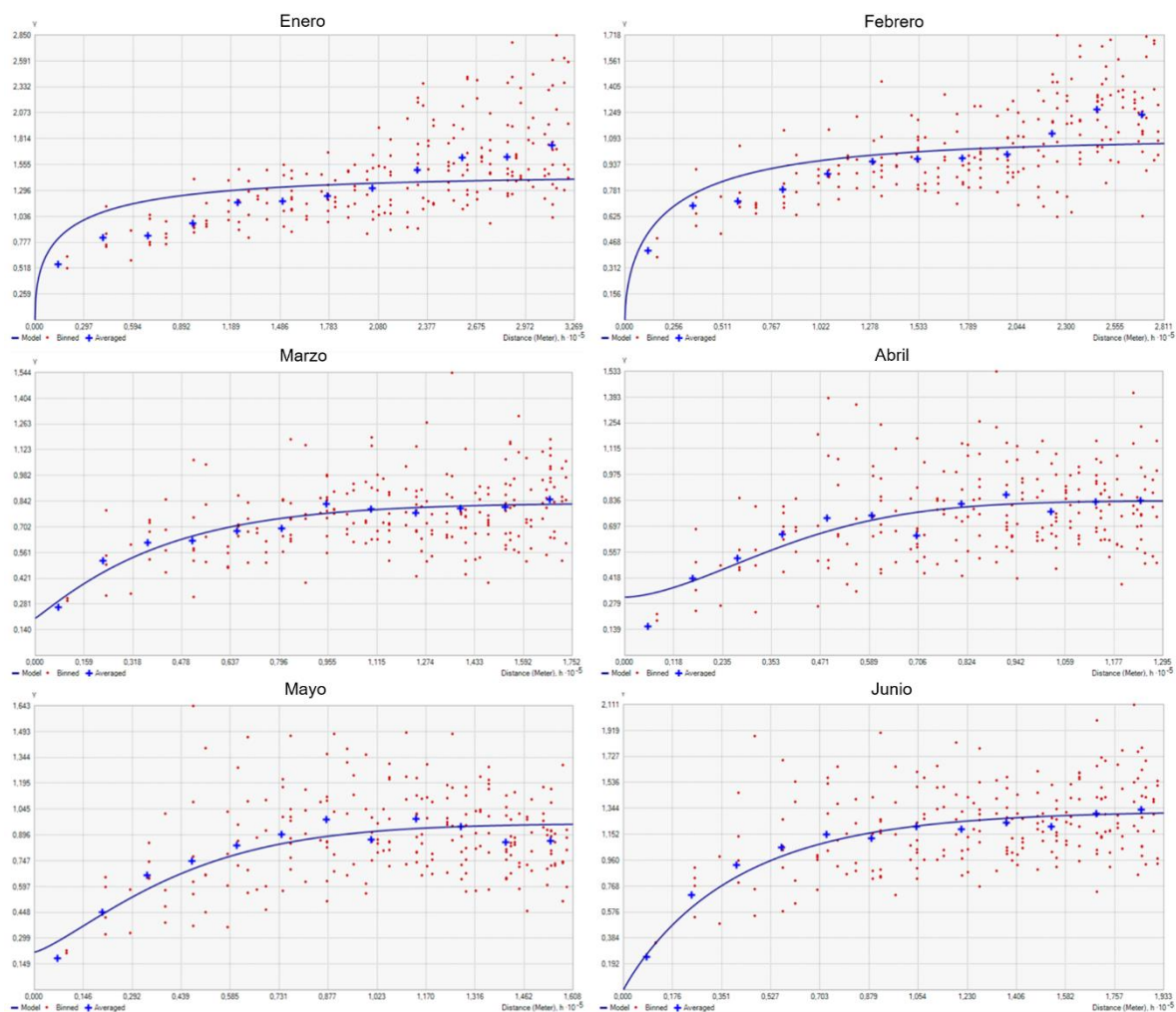


Figura 27. Curvas ajustadas y optimizadas para el variograma de las interpolaciones mensuales de brillo solar con la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el primer semestre del año.

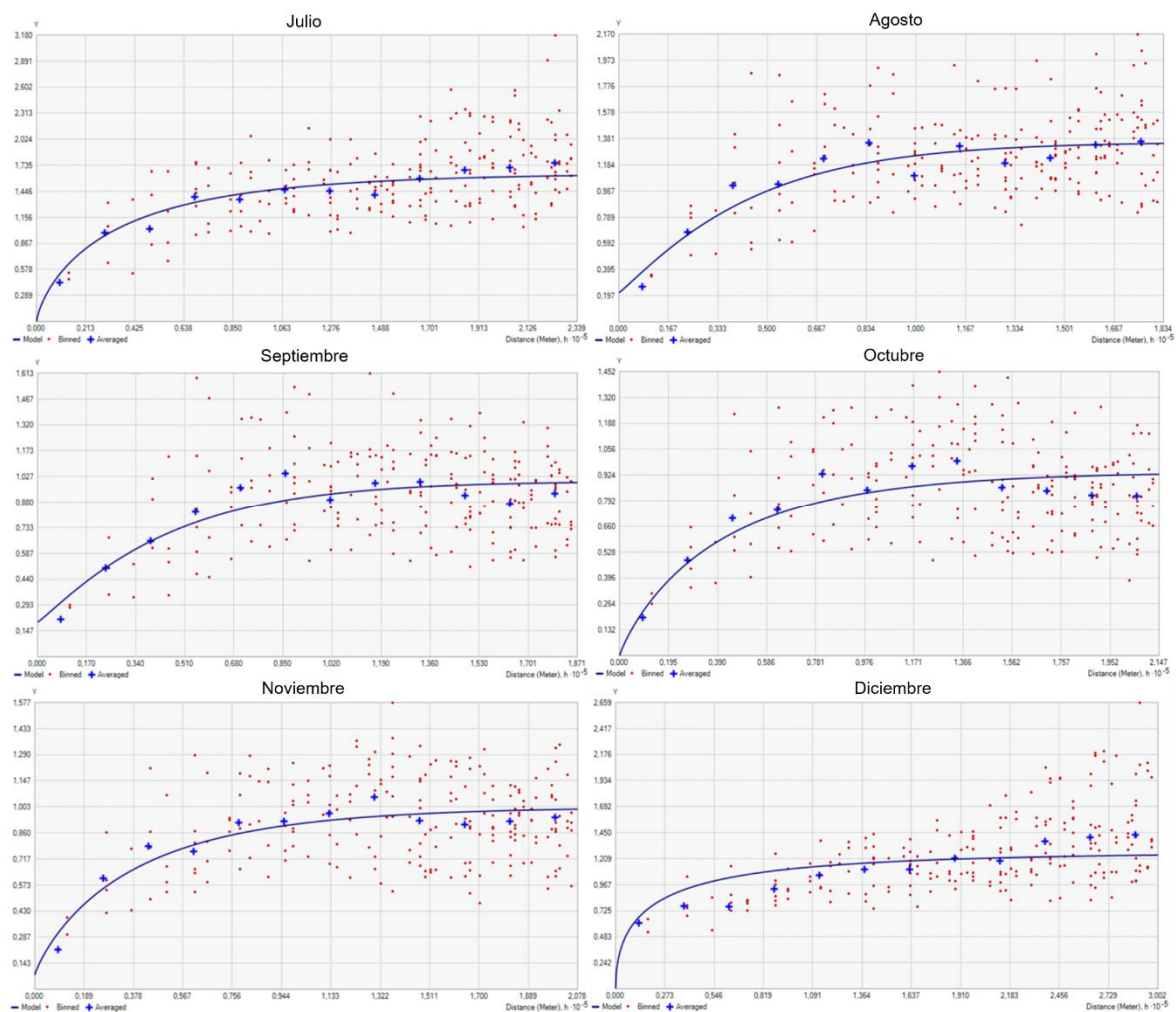


Figura 28. Curvas ajustadas y optimizadas para el variograma de las interpolaciones mensuales de brillo solar con la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el segundo semestre del año.

A pesar de que para todos los meses se usó el mismo tipo de modelo, los variogramas presentan grandes diferencias entre sí. En los meses de enero, febrero, junio, julio, octubre y diciembre no se presenta efecto pepita, es decir, que el valor en el cual la curva ajustada intercepta el eje Y es cero. El resto de los meses, se presenta este efecto generado por la variación de microescala y errores de medición. La forma de la curva varía igualmente, presentando los meses de diciembre, enero y febrero una curva muy cercana al eje Y en las distancias cercanas al origen; pero otros meses como abril, mayo y agosto presentan una curva más aproximada a la curva ajustada para el modelo Gaussiano.

Los mejores ajustes se presentan en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio y noviembre, principalmente, debido a que la curva ajustada se acerca más a los valores promedio del variograma. Otros meses como enero y diciembre no presentan tan buenos ajustes.

En términos generales, se observa una autocorrelación espacial de los datos en todos los meses, en la cual los puntos más cercanos entre sí tienden a tener valores similares debido a que presentan unas diferencias cuadradas menores.

6.1.2 Mapas mensuales

Los mapas mensuales de brillo solar construidos con la metodología UK_CLARA_60_Estable se muestran en las Figuras Figura 29 y Figura 30.

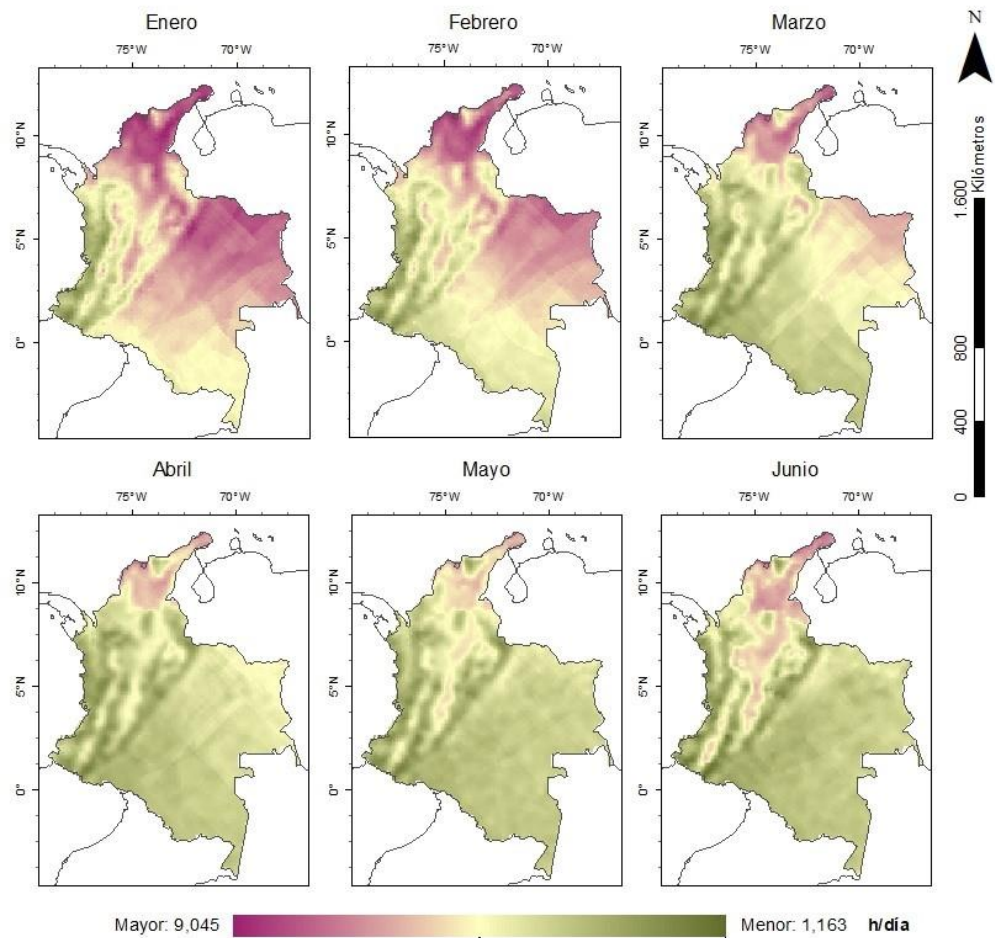


Figura 29. Mapas interpolados mensuales de brillo solar expresado en horas por día (h/día) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el primer semestre del año.

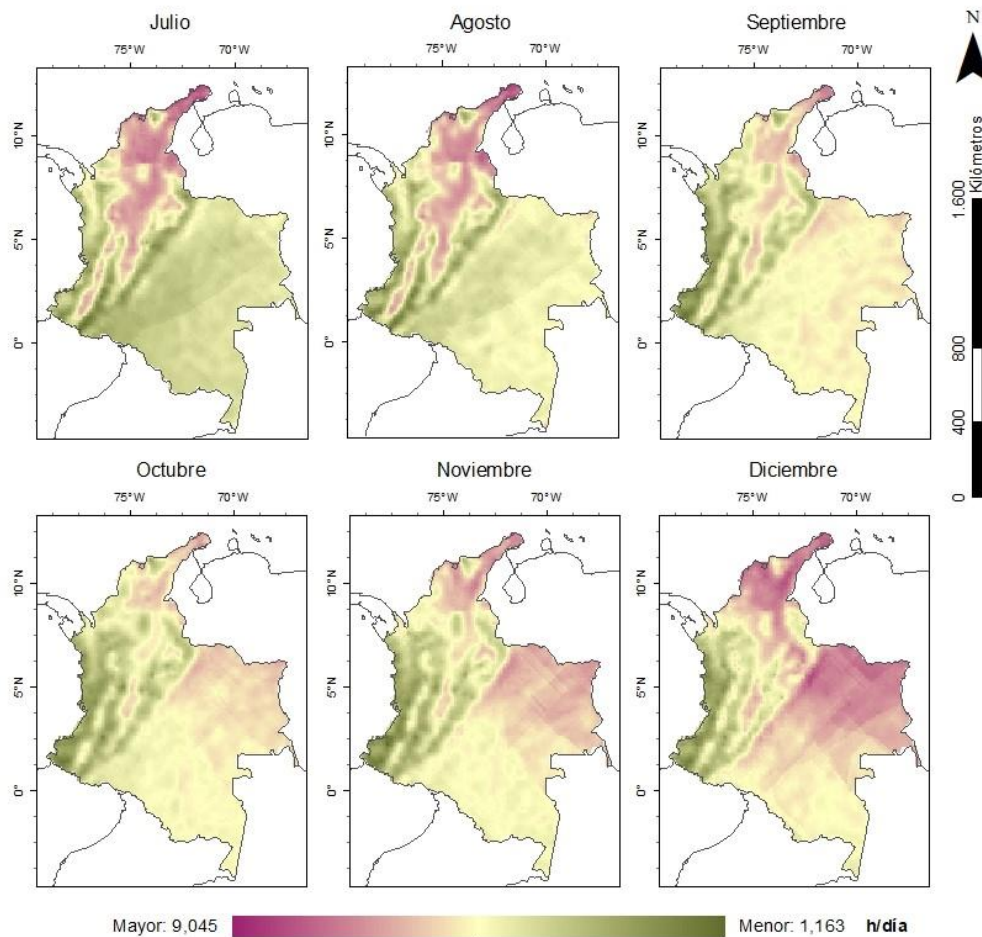


Figura 30. Mapas interpolados mensuales de brillo solar expresado en horas por día (h/día) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el segundo semestre del año.

Se observa que los meses diciembre, enero y febrero presentan la mayor cantidad de luz solar diaria, siendo enero el mes con mayor brillo solar. Para la región Caribe, se presentan los valores más altos en todo el año, disminuyendo su valor en los bimestres abril-mayo y septiembre-octubre, siendo mayo y octubre los meses con menor brillo solar. La región de los Andes presenta intensidades de medias a altas en sus valles interandinos, presentando las primeras durante los trimestres MAM y SON, e intensidades bajas durante casi todo el año, que en muy pocas ocasiones son medias y altas en lugares específicos, a lo largo de los tres ramales de la cordillera de los Andes. El Pacífico muestra valores muy bajos de brillo solar durante todo el año, con intensidades más altas de brillo solar en el norte de la región durante los meses de junio, julio y agosto. La región Orinoco-Amazonía, por otra parte, muestra altas intensidades de brillo solar en el noroccidente durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, presentando en algunas zonas al norte de la región valores similares o incluso mayores a los de la región Caribe.

6.2 IRRADIACIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo Ångström–Prescott para obtener campos mensuales de irradiación y de otros análisis adicionales realizados.

6.2.1 Modelo Ångström–Prescott

Las regresiones lineales construidas a partir de los valores diarios de brillo solar e irradiación se muestran en las Figuras Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34 para las regiones Andes, Pacífico, Orinoco-Amazonía y Caribe, respectivamente.

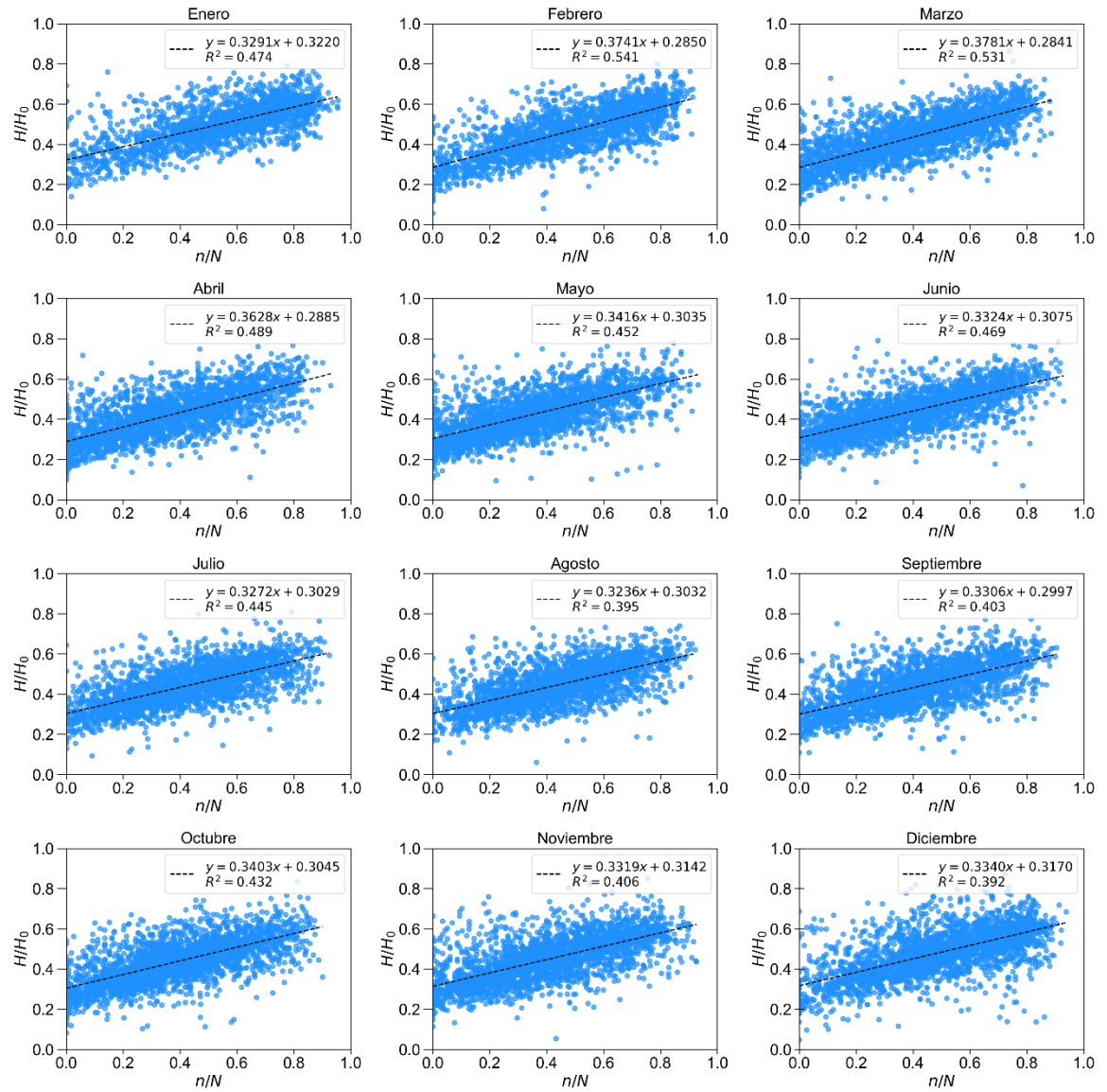


Figura 31. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott para la región Andes.

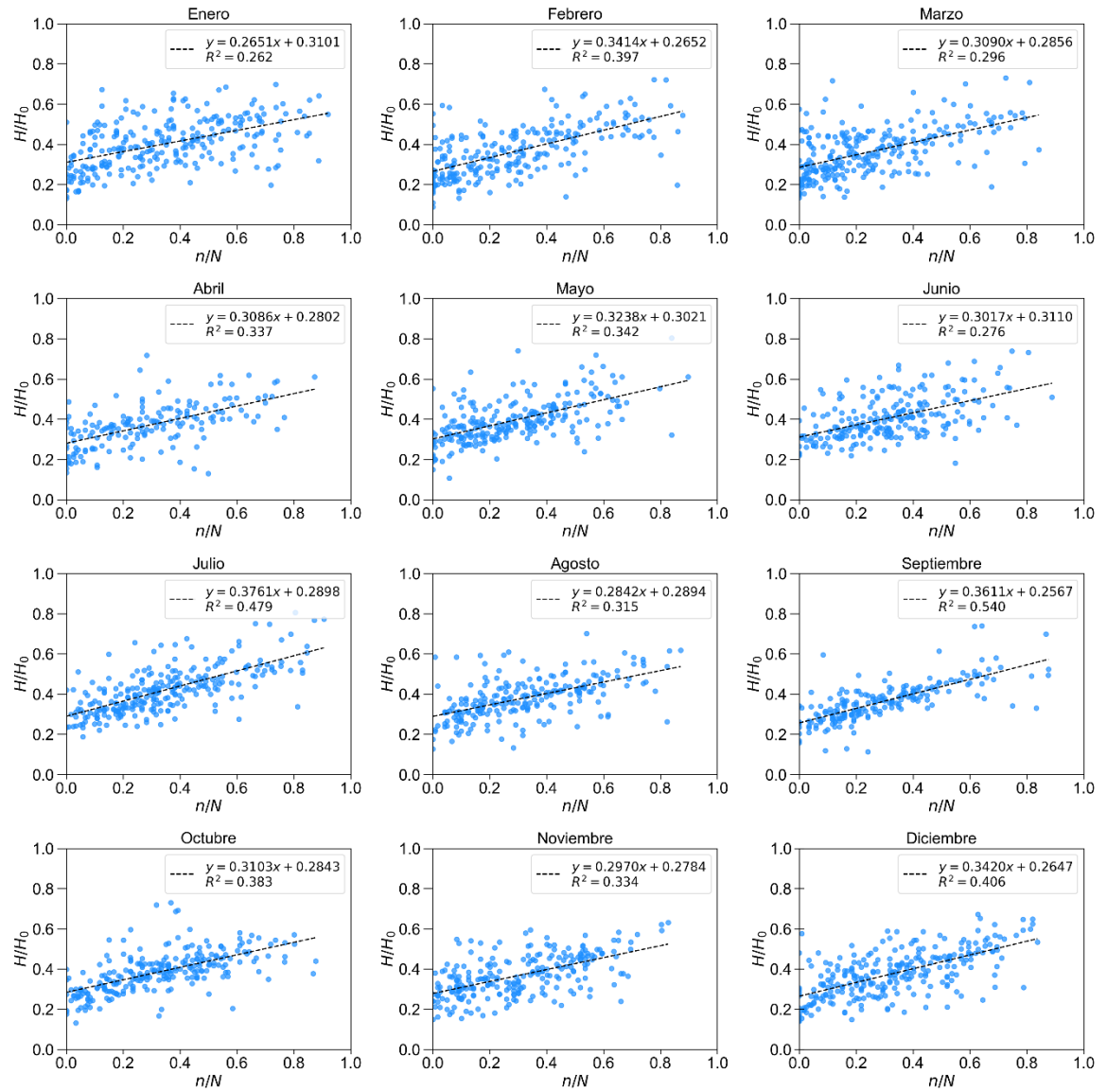


Figura 32. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott para la región Pacífico.

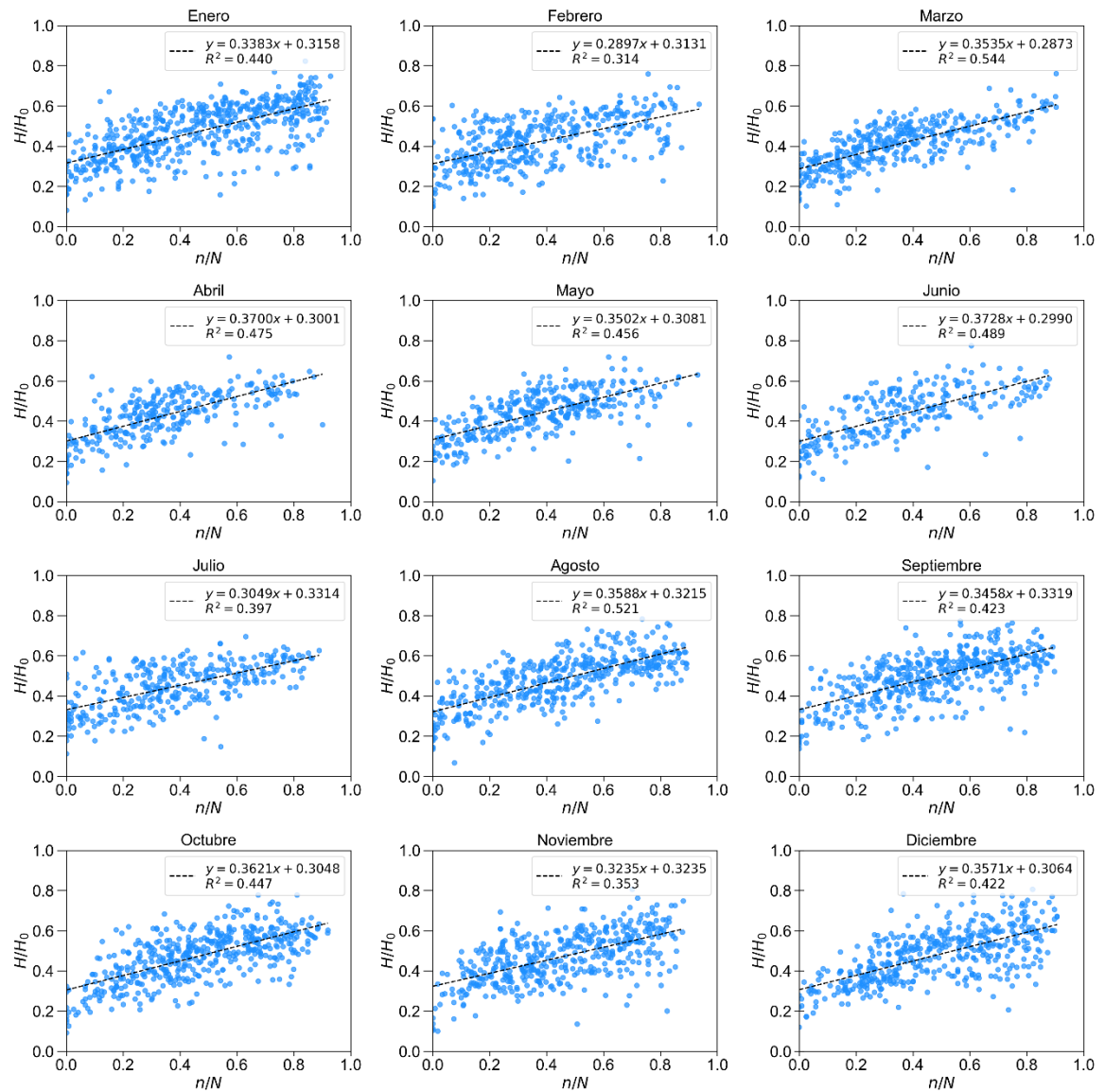


Figura 33. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott de cada mes para la región Orinoco-Amazonía.

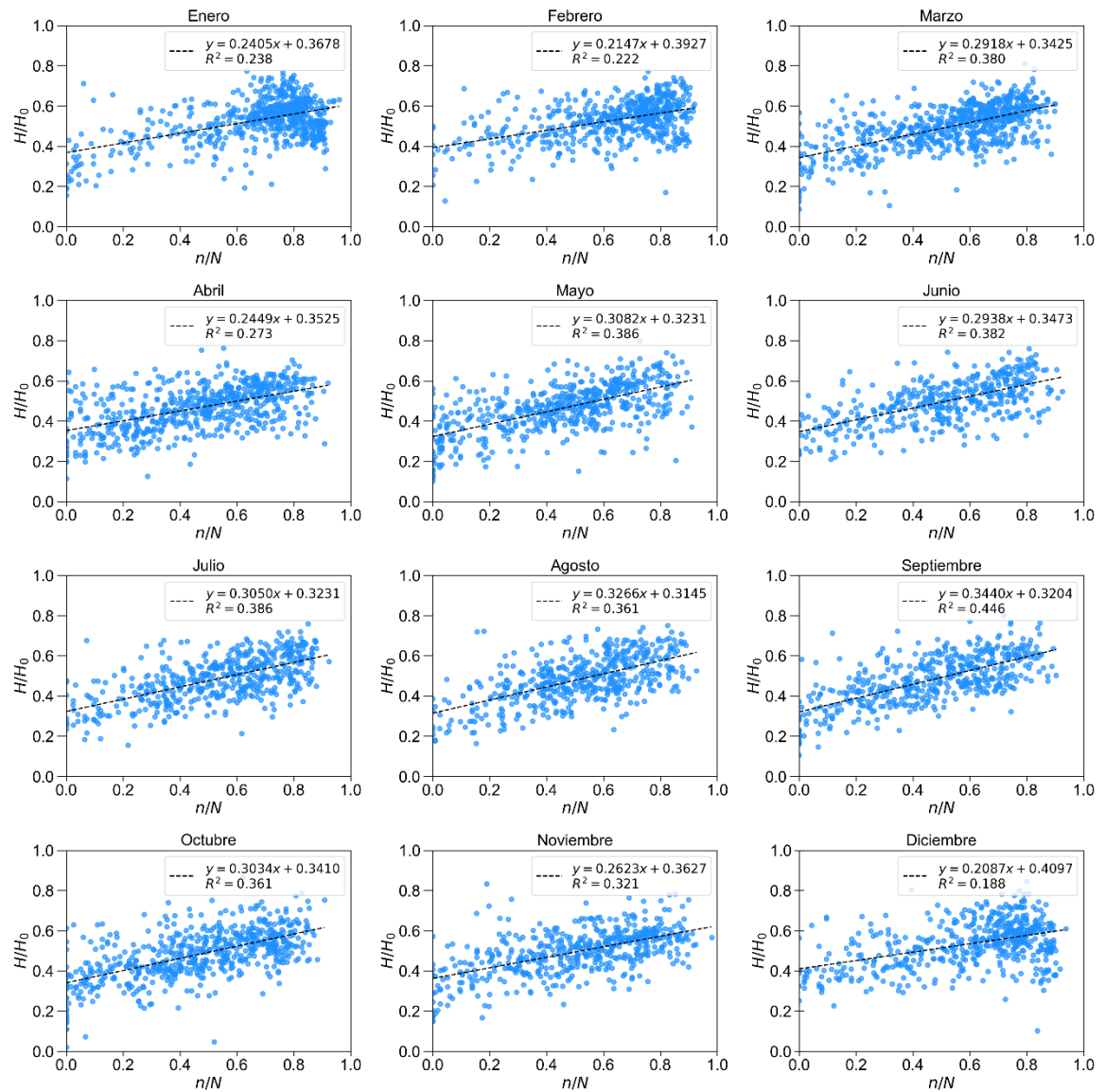


Figura 34. Regresiones lineales mensuales con sus ecuaciones de ajuste de la línea de tendencia y coeficientes de determinación R^2 para las relaciones H/H_0 y n/N del modelo Ångström-Prescott de cada mes para la región Caribe.

Estas regresiones presentan una ecuación asociada al ajuste de la tendencia a los datos dispersos, cuyo intercepto y pendiente corresponden a las constantes a y b , que no coinciden con los valores usados de a y b mensuales en las regiones Caribe y Pacífico debido al ajuste descrito anteriormente. Las constantes a y b mensuales, usadas después del ajuste a estas dos regiones, se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13. Constantes empíricas a y b calculadas a partir de las regresiones lineales entre H/H_0 y n/N para los meses del año en las regiones climáticas.

	Andes		Pacífico		Orinoco-Amazonía		Caribe	
	a	b	a	b	a	b	a	b
<i>Enero</i>	0,322	0,329	0,333	0,278	0,316	0,338	0,345	0,285
<i>Febrero</i>	0,285	0,374	0,314	0,310	0,313	0,290	0,339	0,294
<i>Marzo</i>	0,284	0,378	0,304	0,326	0,287	0,353	0,313	0,335
<i>Abril</i>	0,289	0,363	0,307	0,305	0,300	0,370	0,321	0,304
<i>Mayo</i>	0,303	0,342	0,310	0,325	0,308	0,350	0,313	0,325
<i>Junio</i>	0,307	0,332	0,322	0,309	0,299	0,373	0,327	0,313
<i>Julio</i>	0,303	0,327	0,305	0,336	0,331	0,305	0,313	0,316
<i>Agosto</i>	0,303	0,324	0,302	0,311	0,321	0,359	0,309	0,325
<i>Septiembre</i>	0,300	0,331	0,292	0,345	0,332	0,346	0,310	0,337
<i>Octubre</i>	0,304	0,340	0,310	0,318	0,305	0,362	0,323	0,322
<i>Noviembre</i>	0,314	0,332	0,318	0,297	0,323	0,324	0,338	0,297
<i>Diciembre</i>	0,317	0,334	0,330	0,295	0,306	0,357	0,363	0,271

La Figura 35 muestra las ecuaciones del modelo Ångström-Prescott para cada uno de los meses del año en las diferentes regiones climáticas.

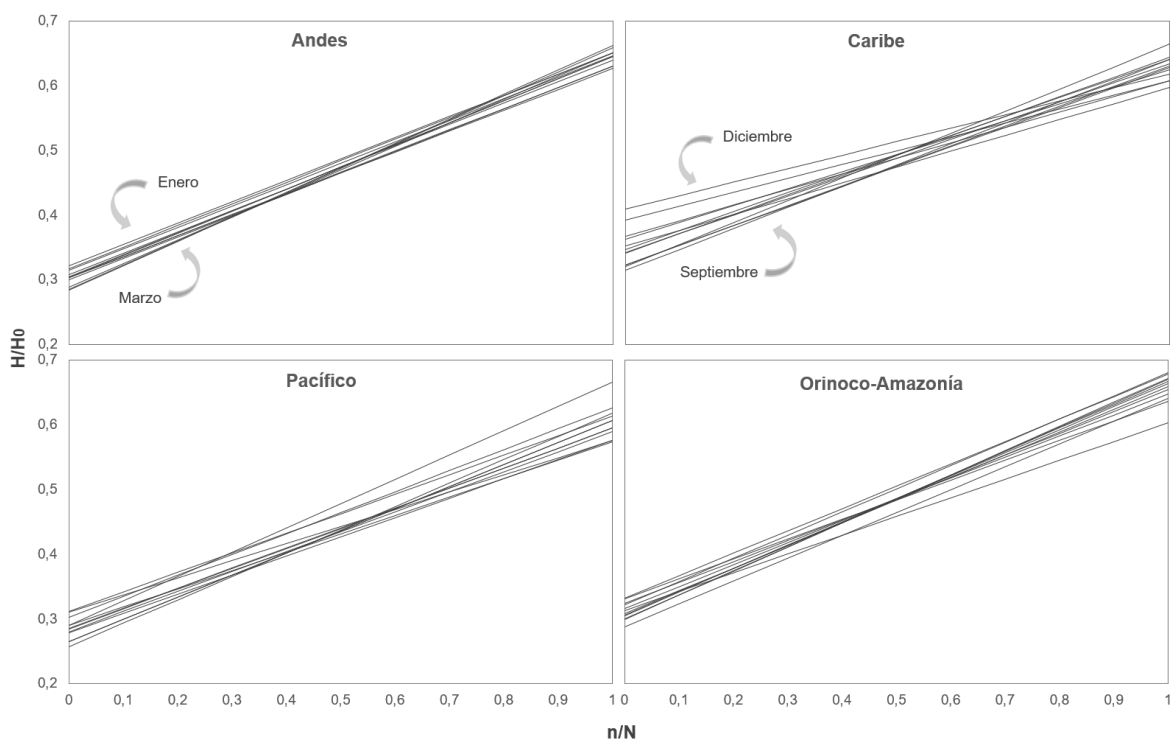


Figura 35. Ecuaciones del modelo Ångström-Prescott de los meses del año para las regiones climáticas.

En un estudio realizado por Paulescu et al. (2016), se llevó a cabo un análisis de la dependencia de las constantes del modelo con diferentes parámetros geográficos y estacionales. Los resultados mostraron que, en el mes de julio para las latitudes comprendidas entre los 30°N y los 60°N, las trayectorias de las líneas rotaban en un punto de específico de n/N . Se mostró que el índice de claridad n/N decrece cuando incrementa la latitud en condiciones nubosas, y viceversa en condiciones soleadas; lo que implica que, a mayor latitud, la cantidad de nubes aumenta y la atmosfera se vuelve más pura.

Los resultados del estudio realizado por Paulescu et al. (2016) son consistentes con los resultados presentados en este estudio para las regiones Andes y Caribe que, a grandes rasgos, muestran una dependencia de las constantes del modelo con la temporada del año. Aquellos meses que constituyen las temporadas secas dentro del ciclo anual de precipitación para estas dos regiones, tienden a presentar mayores valores de a (intercepto con el eje Y) y menores valores de b (pendiente). Lo contrario sucede para los meses lluviosos, que tienden a presentar mayores valores de b y menores valores de a . Para las regiones Pacífico y Orinoco-Amazonía no se exhibe tal comportamiento. Estas particularidades pueden estudiarse con mayor detenimiento en trabajos futuros, con el objetivo de identificar dependencias de las constantes del modelo con factores geográficos y temporales en las regiones climáticas de Colombia.

6.2.2 Mapas mensuales

Las Figuras Figura 36 y Figura 37 muestran los mapas de irradiación mensual generados con la aplicación del modelo usando las constantes a y b calculadas y los mapas mensuales de H_0 y N .

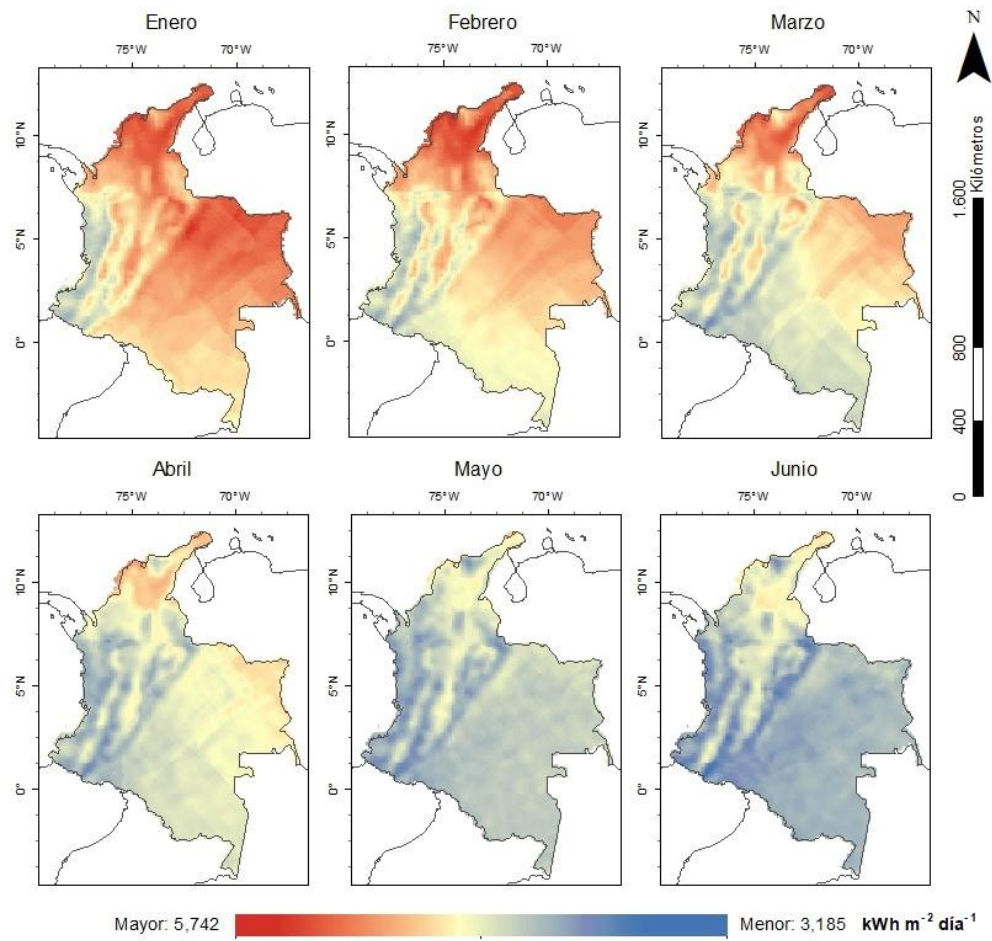


Figura 36. Mapas mensuales de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el primer semestre del año.

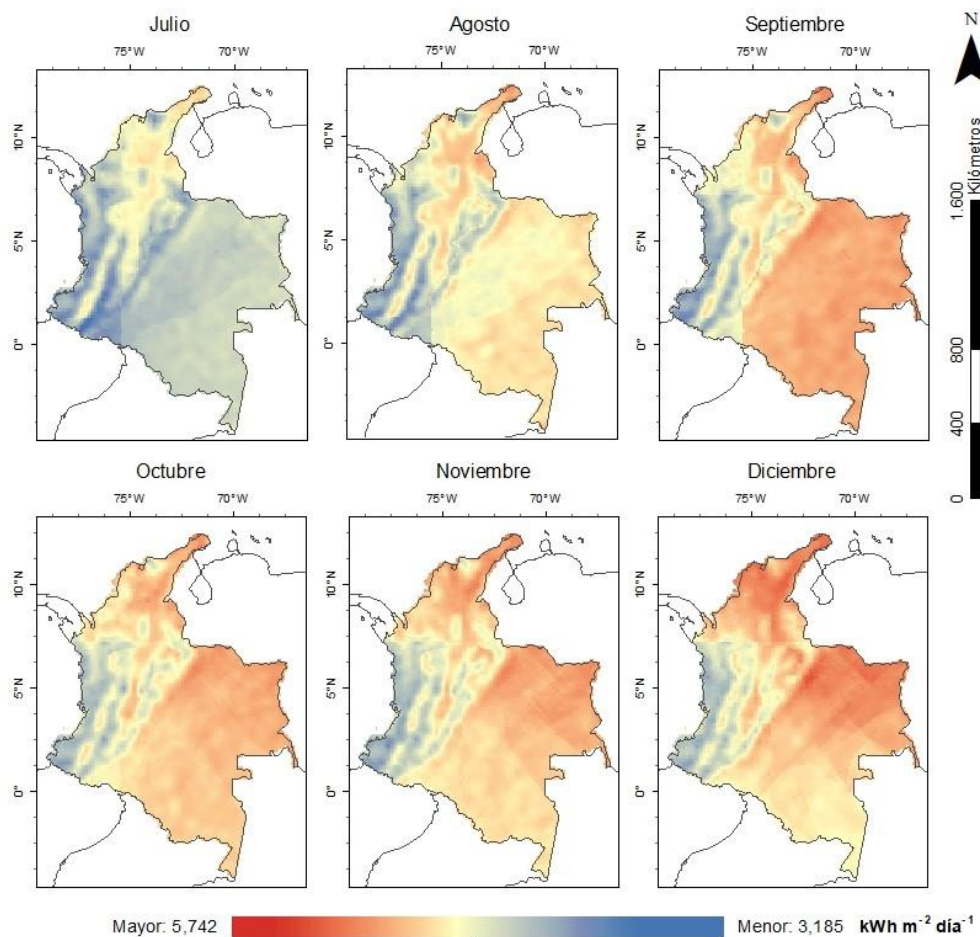


Figura 37. Mapas mensuales de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) usando la combinación UK_CLARA_60_Estable, para el segundo semestre del año.

De los mapas mensuales de irradiación se observa que los meses de mayor intensidad de radiación para el norte del país corresponden a enero, febrero, marzo y diciembre, respectivamente, y los de menor intensidad corresponden a mayo, junio y julio. La Sierra Nevada de Santa Marta responde a una dinámica diferente a la presentada en su región: tiene valores bajos de radiación durante la mayor parte del año, pero en los meses de diciembre, enero y febrero, presenta los valores más altos, cercanos a los presentados en la región Caribe, siendo difícil identificar en los mapas su típica forma triangular durante estos meses.

Los valles interandinos presentan los mayores valores en los meses de diciembre, enero y febrero, y los valores más bajos durante abril, mayo y junio. Las cordilleras, por otra parte, presentan los valores de brillo solar más bajos durante los meses de mayo, junio y julio y aquellos más altos en diciembre, enero y febrero. Estos dos elementos pueden ser diferenciados porque la magnitud de los primeros es significativamente mayor durante todo el año.

La región del Pacífico mantiene valores bajos durante todo el año, y la región Orinoco-Amazónía presenta valores comparables o superiores a los de la región Caribe durante los meses de diciembre y enero, principalmente en el noroccidente de la región, y los valores más bajos los presenta en los meses de mayo, junio y julio. El mes de septiembre exhibe una particularidad de un aumento casi uniforme de la irradiación en toda la región.

6.2.3 Ciclo anual de irradiación

Las Figuras Figura 38, Figura 39, Figura 40 y Figura 41 muestran los ciclos anuales de radiación solar de 30 municipios de Colombia agrupados en las regiones climáticas, generados con los mapas mensuales de irradiación.

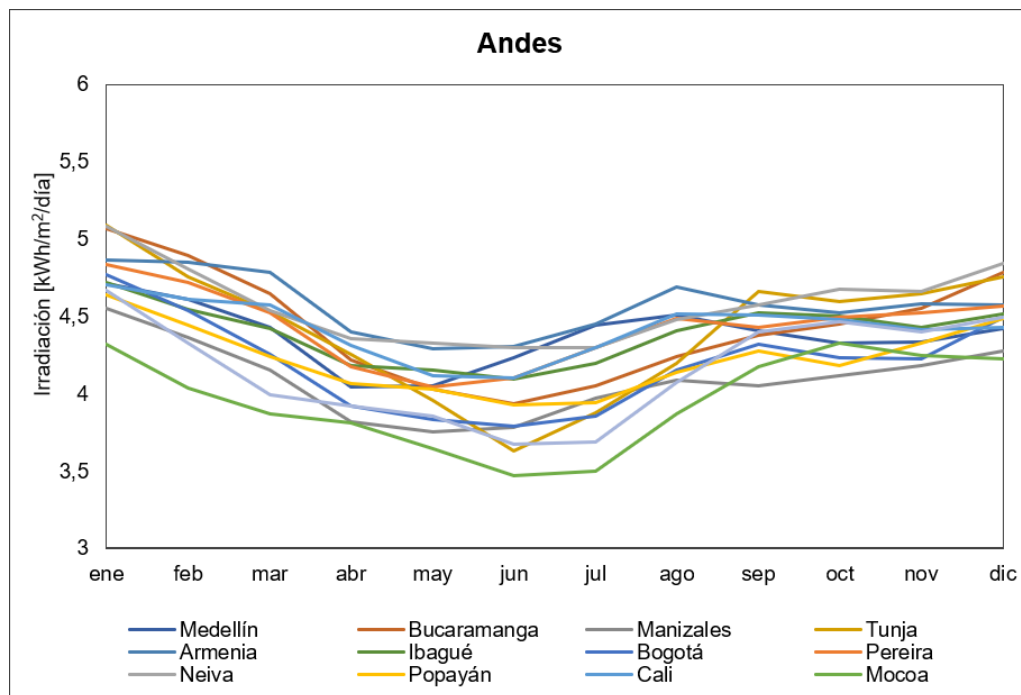


Figura 38. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (kWh/m²/día) de 12 municipios de la región Andes.

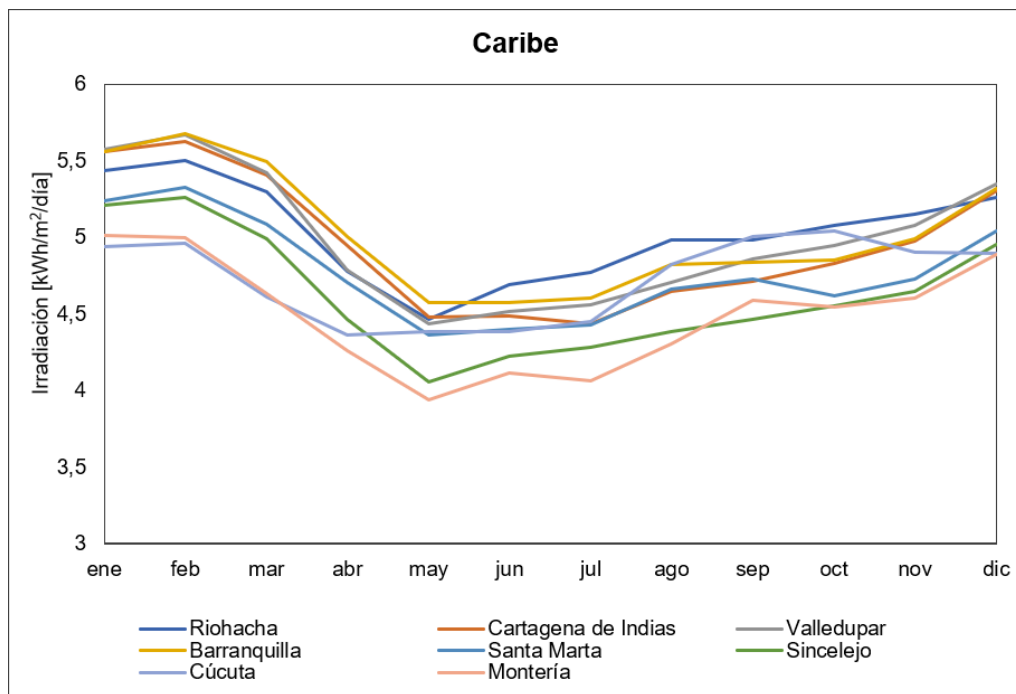


Figura 39. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) de 8 municipios de la región Caribe.

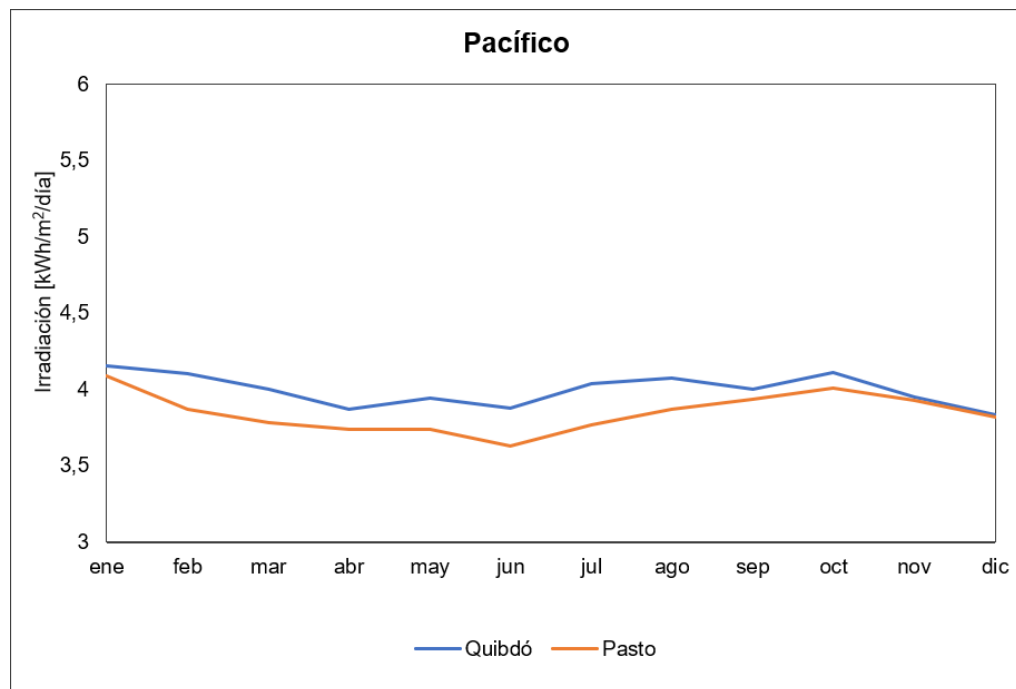


Figura 40. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$) de 2 municipios de la región Pacífico.

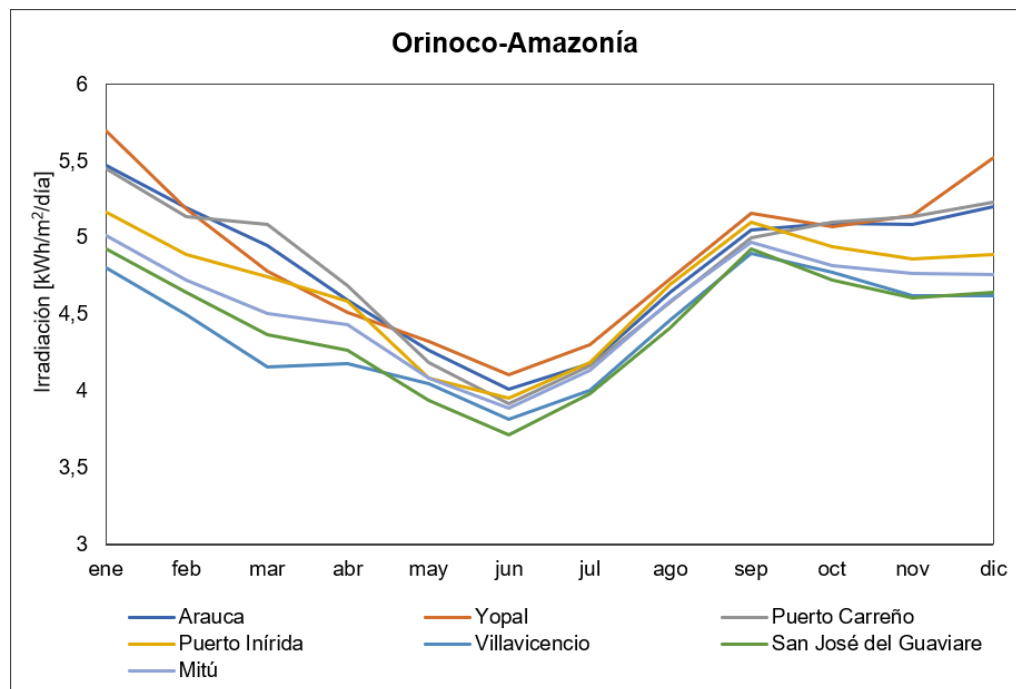


Figura 41. Ciclo anual de irradiación expresada en kilovatios-hora por metro cuadrado por día (kWh/m²/día) de 7 municipios de la región Orinoco-Amazonía.

La mayoría de los municipios en la región de los Andes presentan un ciclo anual similar a su ciclo anual de brillo solar presentado en la Figura 13, con un comportamiento bimodal en donde los trimestres MAM y SON presentan una menor intensidad de irradiación. Sin embargo, algunos municipios al sur de la región Andes no presentan este comportamiento, sino que se asemejan más al ciclo anual de brillo solar de la región Orinoco-Amazonía. Para la región Orinoco-Amazonía, los municipios exhiben un ciclo anual común, con valores de mayor intensidad de irradiación en los meses de diciembre, enero y septiembre; y los de menor intensidad, a mitad del año. Igualmente, la región Caribe presenta ciclos anuales similares, con valores significativamente altos en el primer trimestre del año. Los dos municipios ubicados en el Pacífico parecen tener un ciclo en común: valores bajos en la mitad del año, pero altos en los meses de enero y octubre.

En conclusión, las regiones Andes y Orinoco-Amazonía presentan algunas similitudes con los ciclos anuales de brillo solar expuestos en la Figura 13. La región Caribe, aunque no presenta un comportamiento muy alejado a su ciclo de brillo solar, tampoco exhibe un marcado comportamiento bimodal. La región Pacífico se aleja totalmente del ciclo anual de brillo solar, que define la mitad del año como un periodo con los valores más altos.

Estas diferencias se generan porque los ciclos anuales de brillo solar fueron construidos con las 276 estaciones cuyo periodo de registro era mínimo de 10 años, y éstos en cambio, se construyeron con aquellas estaciones que registraran datos de brillo solar y de irradiación con un periodo significativamente corto, en el cual no se alcanzó a captar el comportamiento histórico de la radiación solar. Sin embargo, los promedios mensuales de irradiación global expuestos en el portal interactivo del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia para las capitales del país, se ajustan muy bien a los expuestos en las Figuras 38, Figura 39, Figura 40 y Figura 41.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

Se evaluaron 42 combinaciones de parámetros asociados a las metodologías de interpolación IDW, TPS, OK y UK para generar mapas anuales de brillo solar usando información medida en tierra proveniente 276 estaciones del IDEAM y de información derivada de satélite de precipitación acumulada, elevación y flujo de radiación de onda corta. Se seleccionaron nueve combinaciones de parámetros que presentaron los menores errores, para las cuales se generaron mapas anuales de brillo solar. Se implementó el modelo Angström-Prescott para convertir brillo solar en irradiación, generando mapas de esta variable climática que se basaron en una zonificación climática que divide el país en cuatro regiones con climatología común: Andes, Pacífico, Orinoico-Amazonía y Caribe.

La metodología de interpolación UK, utilizando información de brillo solar de estaciones en tierra y el producto SIS del conjunto de datos derivados de satélites CLARA-A1 como tendencia, generó los mejores resultados dentro de las 42 combinaciones de parámetros evaluadas. Para brillo solar UK_CLARA_60_Estable presentó un MBE de 0,163 horas, un RMSE de 0,817 horas y un MBES de 3,5%. Para irradiación, un MBE de 0,146 kWh/m², un RMSE 0,434 kWh/m² y un MBES de 3,4%, arrojando el RMSE más bajo entre el total de combinaciones evaluadas y mapas que lograron exhibir el comportamiento espacial esperado de las variables de estudio.

Se esperaba que UK usando información secundaria de flujo de radiación de onda corta generara los mejores resultados en la validación y en los mapas generados, debido a la alta correlación mostrada con el brillo solar a través del diagrama de dispersión construido y del coeficiente de correlación de Pearson calculado. Esto demuestra que el uso de información secundaria que pueda inferir la cobertura de las nubes es de gran ayuda para la estimación de campos de radiación solar.

Los mapas de irradiación generados por UK_CLARA_60_Estable pudieron identificar zonas representativas en el relieve colombiano, principalmente las cordilleras occidental, central y oriental, la Sierra de Santa Marta y las depresiones formadas entre las cordilleras, pudiéndose mostrar una correlación entre la elevación y la radiación solar. Asimismo, mostraron una buena representación de la climatología colombiana descrita en estudios pasados. Se pudieron identificar las zonas con más bajos valores de irradiación, correspondientes al occidente colombiano y a las tres cordilleras; y zonas con valores más altos correspondientes principalmente a la zona norte del país y algunas zonas en los valles interandinos. Estas particularidades climáticas responden a la ocurrencia de fenómenos ya discutidos anteriormente como la Corriente de Chorro del Chocó y los vientos alisios del sureste del país que transportan gran cantidad de humedad, y de esta forma terminan modulando los patrones de nubosidad a largo plazo en estas zonas.

Teniendo en cuenta la zonificación climática adoptada en este estudio, los campos anuales usando la combinación por UK_CLARA_60_Estable mostraron buenos resultados para las regiones Andes, Pacífico y Caribe. Sin embargo, para la región Orinoco-Amazonía los resultados obtenidos pueden ser mejorados debido a su baja cobertura de estaciones de brillo solar e irradiación. Por lo tanto, para realizar una buena estimación del recurso solar en esa zona del país, se requiere más información medida en tierra que pueda identificar variaciones de la radiación solar a un nivel más local. En ese sentido, la delimitación

espacial de las regiones climáticas en Colombia puede mejorar empleando fuentes adicionales de información que permitan inferir patrones de variación más locales de la radiación en estas zonas.

Los mapas mensuales de irradiación se generaron a partir de información de brillo solar e irradiación registrada durante un periodo de tiempo no representativo en términos climáticos. Esto podría causar problemas de sesgo en las estimaciones, debido a la dificultad en captar la ocurrencia de eventos macroclimáticos o de periodos neutros. No obstante, teniendo en cuenta la limitada cantidad de estaciones y de años de registro, las estimaciones realizadas a una escala mensual son una buena aproximación del ciclo anual de la radiación solar en las diferentes regiones climáticas de Colombia, especialmente porque el modelo Angström-Prescott para la conversión de datos de brillo solar a irradiación es de gran utilidad cuando se quiere estimar de forma indirecta la radiación, en los casos en donde el número de estaciones en tierra es insuficiente.

En síntesis, el estudio cumplió con su objetivo general de evaluar diferentes metodologías de interpolación de radiación solar en Colombia y seleccionar aquella que mejores resultados presente. Los resultados generados, tanto por los estadísticos de validación calculados, los mapas anuales de brillo solar e irradiación generados y los análisis estadísticos complementarios de la información, pudieron identificar que el mejor desempeño lo obtuvo la metodología UK usando información derivada de satélite de flujo de radiación de onda corta, con otros parámetros asociados a la metodología. Este estudio pretende aportar herramientas para que las interpolaciones a escalas anual y mensual puedan ser mejoradas en un futuro, siendo las últimas aquellas con mayor potencial de mejora debido a la poca información en tierra disponible y a la necesidad de realizar nuevos análisis para reducir los errores en las estimaciones cuando se quiere aumentar la resolución temporal de los campos.

Este estudio se constituye como un insumo importante en el desarrollo de proyectos de generación fotovoltaica, al exponer una caracterización del recurso solar que puede aportar en la optimización de la ubicación y el dimensionamiento de las instalaciones de este tipo de proyectos, en relación con las condiciones climáticas de la zona. Los resultados generados en una escala anual y mensual sirven como información complementaria a la información generada por el IDEAM en el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia realizado por Benavides-Balleteros, Simbaqueva-Fonseca, & Zapata-Lesmes (2017), permitiendo aportar herramientas para mejorar las estimaciones de la radiación solar en Colombia y poder nutrir el conocimiento del público en general sobre el comportamiento de esta variable.

7.1 TRABAJOS FUTUROS

Para mejorar las estimaciones de radiación solar en trabajos futuros, es importante contar con más información medida en tierra, principalmente en la región Orinoco-Amazonía que presenta una crítica escasez de estaciones. Otras zonas con baja densidad corresponden al sur de la región de los Andes, el norte del Pacífico y el norte de la región Caribe, en donde se encuentra la zona con mayor potencial de generación de energía fotovoltaica. Asimismo, la cuantificación y caracterización del recurso solar se puede mejorar en el futuro cuando

se tengan series históricas más completas o se evalúe la posibilidad de reconstruir series de irradiación para Colombia.

Estudios futuros podrían centrarse en definir una zonificación que integre la zonificación climática adoptada en este estudio con recursos hidroclimáticos adicionales, que permitan identificar nuevas variabilidades del clima a escalas más locales, en lugares donde no se cuenta con mucha información. La nueva zonificación podría tener en cuenta patrones de nubosidad regionales y una variación de su delimitación a escala mensual, que sea dependiente de los ciclos anuales de precipitación y radiación solar en estas zonas.

Nuevos estudios podrían evaluar otros enfoques en las interpolaciones de brillo solar, relacionados con la evaluación el desempeño de metodologías, parámetros y fuentes de información secundaria en cada región por separado, con el objetivo de identificar aquellas combinaciones que puedan mostrar mejores desempeños con determinados patrones climáticos propios de una región. Estos nuevos enfoques contemplarían la ejecución de las interpolaciones separadamente para luego, con el uso de otros recursos, unir los campos generados por región para obtener un campo nacional el cual muestre transiciones suavizadas de una región climática a otra. Asimismo, se podría evaluar la inclusión de anisotropía en los campos de brillo solar generados.

8 REFERENCIAS

- Almorox, J. (2011). Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. *Turkish Journal of Physics*, 35, 53–64.
- Almorox, J., Benito, M., & Hontoria, C. (2005). Estimation of monthly Angström-Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. *Renewable Energy*, 30, 931–936.
- Almorox, J., Benito, M., & Hontoria, C. (2008). Estimation of global solar radiation in Venezuela. *Interciencia*, 33, 280–283.
- Álvarez Villa, O. D. (2007). *Cuantificación de la incertidumbre en la estimación de campos hidrológicos. Aplicación al balance hídrico de largo plazo*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Bachour, D., & Perez-Astudillo, D. (2014). Ground-measurement GHI map for Qatar. *Energy Procedia*, 49, 2297–2302.
- Benavides-Balleteros, H. O., Simbaqueva-Fonseca, O., & Zapata-Lesmes, H. J. (2017). *Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia*. Bogotá D.C.
- Berndt, C., & Haberlandt, U. (2018). Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany Influence of temporal resolution and network density. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 184–202.
- Böhner, J., & Bechtel, B. (2017). GIS in Climatology and Meteorology. En Elsevier (Ed.) (pp. 196–236).
- Cepeda Quintero, R. E. (2016). *Evaluación de un periodo espacio-temporal para identificar variaciones en el comportamiento de la heliofonía en el Departamento del Valle del Cauca*. Bogotá D.C.
- Congreso de Colombia. Ley 1715/2014, de 13 de mayo, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional (2014). Colombia.
- CREG. Resolución 243/2016, de 19 de diciembre, por la cual se define la metodología para determinar la energía firme para el Cargo por Confiabilidad, ENFICC, de plantas solares fotovoltaicas (2016). Colombia.
- CREG. Resolución 111/2017, de 08 de agosto, por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, por la cual se realizan ajustes a la Resolución CREG 243 de 2016 que define la ENFICC de plantas solares fotovoltaicas (2017). Colombia.
- Crespo, C., Meizoso, M. del C., Sánchez, F., Rodríguez, B. A., Calvo, J. L., & de Cos, F. J. (2014). Missing Data Imputation of Solar Radiation Data under Different Atmospheric Conditions. *Sensors*, 14, 20382–20399.

ESRI. (2017a). Cómo funciona Kriging.

ESRI. (2017b). How inverse distance weighted interpolation works.

ESRI. (2018). How radial basis functions work. Recuperado a partir de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-radial-basis-functions-work.htm>

GLOBE Task Team, Hastings, D. A., Dunbar, P. K., Elphinstone, G. M., Bootz, M., Hiroshi, M., ... MacDonald, J. S. (1999). The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center.

Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. (2016). TRMM (TMPA) Precipitation L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V7, Edited by Andrey Savtchenko. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).

Grupo Energía de Bogotá. (2017). Sector energético en Colombia.

Guevara-Vásquez, S. (2003). *Estimación de la radiación solar*. Recuperado a partir de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cosude/xxii.pdf>

IDEAM. (s/f). Acerca de la entidad.

IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*.

IDEAM. (2013). *Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas*. Bogotá D.C. Recuperado a partir de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>

IDEAM. (2015). *Aspectos teóricos*.

Jamaly, M., & Kleissl, J. (2017). Spatiotemporal interpolation and forecast of irradiance data using Kriging. *Solar Energy*, 158, 407–423.

Jeon, D. I., St-Hilaire, A., Gratton, Y., Bélanger, C., & Saad, C. (2017). A guideline to select an estimation model of daily global solar radiation between geostatistical interpolation and stochastic simulation approaches. *Renewable Energy*, 103, 70–80.

Karlsson, K.-G., Riihelä, A., Müller, R., Meirink, J. F., Sedlar, J., Stengel, M., ... Wolters, E. (2012). CLARA-A1: CM SAF Clouds, Albedo and Radiation dataset from AVHRR data - Edition 1 - Monthly Means/Daily Means/Pentad Means/Monthly Histograms. Satellite Application Facility on Climate Monitoring.

Lloyd, C. D. (2010). *Spatial data analysis: an introduction for GIS users*. Oxford University Press.

Loghmari, I., Timoumi, Y., & Messadi, A. (2018). Performance comparison of two global

- solar radiation models for spatial interpolation purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 837–844.
- Marzo, A., Trigo-Gonzalez, M., Alonso-Montesinos, J., Martínez-Durbán, M., López, G., Ferrada, P., ... Batlles, F. J. (2017). Daily global solar radiation estimation in desert areas using daily extreme temperatures and extraterrestrial radiation. *Renewable Energy*, 113, 303–311.
- Mateus, A. C. (2016). Crisis energética en Colombia. *TIA*, 74–81.
- Mendez, M., & Calvo-Valverde, L. (2016). Assessing the Performance of Several Rainfall Interpolation Methods as Evaluated by a Conceptual Hydrological Model. *Procedia Engineering*, 154, 1050–1057. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.595>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). La Guajira es el departamento con mayor potencial para la generación de energía limpia en Colombia. Recuperado a partir de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2743-la-guajira-es-el-departamento-con-mayor-potencial-para-la-generacion-de-energia-limpia-en-colombia>
- NASA. (2015). Precipitation Measurement Missions. Recuperado a partir de <https://pmm.nasa.gov/trmm>
- Paulescu, M., Stefu, N., Calinoiu, D., Paulescu, E., Pop, N., Boata, R., & Mares, O. (2016). Ångström–Prescott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 495–506.
- Plouffe, C. C. F., Robertson, C., & Chandrapala, L. (2015). Comparing interpolation techniques for monthly rainfall mapping using multiple evaluation criteria and auxiliary data sources: A case study of Sri Lanka. *Environmental Modelling & Software*, 67, 57–71.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28, 201–222.
- Prescott, J. A. (1940). Evaporation From Water Surface in Relation to Solar Radiation. *Transaction of the Royal Society of South Australia*, 64, 114–118.
- Robaa, S. M. (2009). Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. *Energy Conversion and Management*, 50, 184–193.
- Rodríguez-Amigo, M. C., Díez-Mediavilla, M., González-Peña, D., Pérez-Burgos, A., & Alonso-Tristán, C. (2017). Mathematical interpolation methods for spatial estimation of global horizontal irradiation in Castilla-León, Spain: A case study. *Solar Energy*, 151, 14–21.
- Rodríguez Amigo, M. C., Díez Mediavilla, M., González Peña, D., Pérez Burgos, A., & Alonso Tristán, C. (2017). ELSEVIER. *ELSEVIER*, 151, 14–21.

- Sen, Z., & Sahin, A. D. (2001). Spatial interpolation and estimation of solar irradiation by cumulative semivariograms. *Solar Energy*, 71, 11–21.
- Solargis. (2016). *Solargis Solar Resource Database: Description and Accuracy*. Bratislava.
- Suri, M., & Cebecauer, T. (2012). SolarGIS: Online Access to High-Resolution Global Database of Direct Normal Irradiance. En *SolarPACES* (p. 16). Marrakech.
- Tait, A., & Liley, B. (2009). Interpolation of daily solar radiation for New Zealand using a satellite data-derived cloud cover surface. *Weather and Climate*, 29, 70–88.
- Wagner, P. D., Fiener, P., Wilken, F., Kumar, S., & Schneider, K. (2012). Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*, 464–465, 388–400.
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.07.026>
- Zou, L., Lunche, W., Lin, A., Zhu, H., Peng, Y., & Zhao, Z. (2016). Estimation of global solar radiation using an artificial neural network based on an interpolation technique in southeast China. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 146, 110–122.

ANEXO 1

Tabla 14. Localización y periodo de registro de las 276 estaciones de brillo solar del IDEAM seleccionadas. La altitud, expresada en metros sobre el nivel del mar, y la latitud y longitud, en grados decimales.

Código	Estación	Altitud	Latitud	Longitud	Periodo de registro
48015010	A VASQUEZ COBO	84	-4,194	-69,941	1982-2017
44135010	ARARACUARA [44135010]	150	-0,616	-72,382	1979-2015
47045010	PTO LEGUIZAMO	147	-0,181	-74,776	1978-2017
47015080	MONOPAMBA [47015080]	1776	0,805	-77,304	1984-2016
47015070	PTO UMBRIA [47015070]	362	0,839	-76,570	1986-2012
52055010	APTO SAN LUIS [52055010]	2961	0,857	-77,678	1979-2017
52055020	PARAISO EL [52055020]	3120	1,071	-77,637	1978-2017
52055090	SINDAGUA [52055090]	2800	1,108	-77,389	1987-2017
44015040	MOCOA ACUEDUCTO	650	1,157	-76,652	1985-2017
47015100	ENCANO EL [47015100]	2830	1,160	-77,161	1985-2017
52055040	BOTANA [52055040]	2820	1,160	-77,279	1979-2017
47015090	PRIMAVERA LA [47015090]	2067	1,168	-76,933	1984-2014
52055030	BOMBONA [52055030]	1493	1,184	-77,465	1979-2017
44045020	VALPARAISO [44045020]	270	1,195	-75,704	1978-2016
47015040	MICHOACAN [47015040]	2100	1,198	-76,961	1978-2017
52045010	OBONUCO [52045010]	2710	1,198	-77,303	1978-2015
51025020	RICAU RTE [51025020]	1181	1,200	-77,983	1978-1991
51025050	ALTAQUER [51025050]	1010	1,248	-78,093	1994-2014
44045030	MONO LA [4404503]	300	1,303	-75,808	1979-2016
52045020	APTO ANTONIO NARIÑO	1796	1,394	-77,291	1979-2017
44035030	MACAGUAL [44035030]	280	1,500	-75,661	1976-2016
52045030	SAN BERNARDO	2190	1,539	-77,033	1986-2017
51025010	GRANJA EL MIRA	16	1,550	-78,696	1978-2017
44035020	APTO G ARTUNDUAGA	244	1,589	-75,560	1976-2016

46035010	MAGUARE [46035010]	270	1,640	-75,163	1979-2016
52065020	BARBACOAS [52065020]	32	1,673	-78,135	1982-2012
52025020	MILAGROS LOS [52025020]	2300	1,753	-76,892	1978-2017
52025030	MERCADERES [52025030]	1174	1,760	-77,159	1978-2016
21015020	SEVILLA [21015020]	1320	1,825	-76,130	1979-2016
52025010	BOLIVAR [52025010]	1510	1,830	-77,004	1979-2016
44015030	VALENCIA [44015030]	2900	1,900	-76,669	1979-2016
21035020	RESINA [21035020]	2102	1,914	-75,679	1979-2007
46035020	PUERTO RICO [46035020]	285	1,918	-75,151	1984-2010
21025030	ALTAMIRA EL GRIFO	1368	2,079	-75,736	1996-2016
52015020	FONDA LA CITEC	580	2,146	-77,046	1979-2013
32035010	MACARENA LA [32035010]	248	2,176	-73,793	1978-2017
52025050	SIERRA LA [52025050]	1870	2,194	-76,750	1979-2016
21055030	STA LETICIA [21055030]	2085	2,241	-76,164	1979-2016
21065040	ZULUAGA [21065040]	1270	2,253	-75,529	1979-2016
31015010	TRUENO EL [31015010]	150	2,373	-72,640	1982-2017
21055020	ESC AGR LA PLATA	1070	2,378	-75,891	1979-2016
26035030	APTO G L VALENCIA	1752	2,453	-76,609	1980-2017
26035070	CARPINTERIAS HDA	2500	2,467	-76,933	1992-2001
26025070	GABRIEL LOPEZ	371	2,510	-76,289	1979-2016
32105070	SAN JOSE GUAVIARE	165	2,553	-72,647	1984-2015
53045010	BONANZA [53045010]	10	2,567	-77,883	1979-2006
53045030	APTO GUAPI [53045030]	42	2,574	-77,895	1999-2017
26025090	VENTA DE CAJIBIO	185	2,585	-76,562	1979-2017
21105050	ROSALES LOS [21105050]	553	2,603	-75,418	1979-2013
21085030	SAN RAFAEL [21085030]	1030	2,760	-75,583	1986-2016
21055040	TOEZ [21055040]	1860	2,817	-76,083	1979-1994
21095010	JUNCAL EL [21095010]	460	2,829	-75,331	1981-2016
21125010	STA MARIA [21125010]	1300	2,936	-75,589	1979-2016
21115100	PALACIO-VEGALARGA	1100	2,943	-75,066	1979-2016
32075030	VISTA HERMOSA	325	3,120	-73,754	1979-2015
22025010	APTO PLANADAS	1355	3,167	-75,667	1980-1993

26055050	POTRERITO [26055050]	125	3,243	-76,592	1979-1992
26065020	MIRANDA [26065020]	1133	3,246	-76,223	1979-2017
32075080	PTO LLERAS [32075080]	245	3,268	-73,373	1990-2015
26065010	ING CAUCA [26065010]	13	3,269	-76,347	1979-2016
21145070	LEGIOSA LA [21145070]	1476	3,311	-74,703	1979-2016
21145040	SAN ALFONSO [21145040]	440	3,373	-75,110	1979-2016
32075050	MESETAS [32075050]	620	3,380	-74,043	1980-2017
26055070	UNIV DEL VALLE	996	3,378	-76,534	1979-2016
22055020	MESA DE POLE [22055020]	699	3,456	-75,536	1979-2012
26075010	PALMIRA ICA [26075010]	118	3,513	-76,315	1979-2017
32075040	HOLANDA LA [32075040]	360	3,516	-73,716	1983-2015
21155040	DOLORES HDA MADRON	1456	3,533	-74,906	1979-2005
26075040	APTO A BONILLA	970	3,537	-76,387	1976-2017
21135030	ANCHIQUE [21135030]	415	3,574	-75,109	1979-2016
35015050	BARBASCAL [35015050]	250	3,631	-73,349	1992-2017
26075100	GJA EXP HOESCHST	950	3,633	-76,433	1990-2004
35015030	SAN CARLOS GUAROA	230	3,717	-73,250	1982-1992
22045010	DEMOSTRACION GJA	908	3,722	-75,503	1984-2012
26095080	TENERIFE [26095080]	2628	3,730	-76,075	1976-2015
21165010	PST DE MONTA [21165010]	321	3,788	-74,917	1987-2012
26095230	VINCULO EL [26095230]	981	3,835	-76,300	1983-2016
21135020	JABALCON [21135020]	332	3,856	-75,016	1979-2011
53115020	COLPUERTOS [53115020]	10	3,883	-77,067	1980-2001
31095010	PTO INIRIDA [31095010]	100	3,868	-67,932	1978-2017
21165030	LOZANIA [21165030]	394	3,898	-74,772	1978-2012
22065040	SAN ANTONIO QUINTA	1448	3,907	-75,488	1981-2012
54075020	BAJO CALIMA [54075020]	66	3,954	-76,990	1979-2017
21185030	GUAMO [21185030]	3319	4,009	-74,981	1979-2012
35025020	LIBERTAD LA [35025020]	336	4,057	-73,468	1979-2017
35035020	APTO VANGUARDIA	422	4,162	-73,618	1979-2017
26125130	CUMBARCO [26125130]	1749	4,185	-75,832	1979-2017
21185020	NATAIMA [21185020]	393	4,188	-74,960	1981-2009

21195060	PANDI [21195060]	950	4,193	-74,487	1979-2015
54075040	MISION LA [54075040]	14	4,223	-77,276	1979-2015
21185040	APTO SANTIAGO VILA	305	4,275	-74,798	1983-2017
35045020	CABAÑA LA HDA	305	4,300	-73,358	1982-2017
21215140	CEMENTOS DIAMANTE	780	4,331	-75,081	1980-2005
35125010	MARGARITAS LAS HDA	150	4,341	-72,156	1998-2017
35055010	JAPON EL [35055010]	280	4,377	-73,301	1978-2016
21195120	ITA VALSALICE [21195120]	1460	4,396	-74,396	1993-2016
26115030	TIERRABLANCA [26115030]	916	4,417	-76,100	1979-1990
21245040	APTO PERALES [21245040]	943	4,424	-75,139	1979-2016
21245010	PERALES HATO OPIA	826	4,430	-75,201	1980-2012
21215100	CAJAMARCA [21215100]	1920	4,442	-75,425	1979-2009
26125060	APTO EL EDEN [26125060]	1229	4,455	-75,766	1992-2017
35105050	GUAICARAMO [35105050]	190	4,469	-72,954	1994-2017
21205720	SAN JORGE GJA [21205720]	2900	4,506	-74,189	1983-2016
33055010	CUMARIBO [33055010]	167	4,495	-69,803	1991-2017
26115040	CENT ADMO LA UNION	934	4,531	-76,062	1979-2016
35105020	BARRANCA DE UPIA	225	4,567	-72,967	1978-1990
35025060	BOLSA LA [35025060]	3195	4,575	-73,981	1987-2016
33035010	CARIMAGUA [33035010]	200	4,574	-71,341	1978-2014
21205230	OBS MET NACIONAL	2556	4,633	-74,100	1980-1993
35095110	HUERTA LA GRANDE	255	4,655	-72,917	1995-2017
21205420	TIBAITATA [21205420]	2543	4,691	-74,209	1982-2016
54085010	NOANAMA [54085010]	28	4,688	-76,934	1979-2015
21205520	ELDORADO DIDACTICA	2546	4,700	-74,150	1979-1996
21205790	APTO EL DORADO	2547	4,706	-74,151	1980-2016
21205770	BASE AEREA MADRID	2550	4,729	-74,273	1979-2016
54035020	ARGELIA EL RECREO	1600	4,733	-76,117	1979-1994
21205670	FLORIDA LA [21205670]	1915	4,771	-74,438	1979-1995
21206050	ESC COL INGENIERIA	2650	4,783	-74,050	1986-2007
21255080	SALTO EL [21255080]	1139	4,784	-74,768	1980-2012
21205980	PROVIDENCIA GJA	2560	4,792	-74,201	1981-2015

26135040	APTO MATECANA	1199	4,816	-75,737	1980-2017
21255140	QUINTA LA [21255140]	429	4,822	-74,921	1984-2013
35065010	GACHETA [35065010]	1752	4,830	-73,646	1979-2016
21255150	GARCIA HDA [21255150]	350	4,855	-74,892	1987-2012
26135110	VERACRUZ [26135110]	17	4,868	-75,628	1979-2016
26135100	BOHEMIA LA [26135100]	995	4,878	-75,878	1979-2017
54025010	SAN JOSE PALMAR	111	4,898	-76,232	1979-2016
23065100	SABANETA [23065100]	2475	4,902	-74,307	1986-2016
35225020	MODULOS [35225020]	130	4,910	-71,433	1984-2017
26155150	BRISAS LAS [26155150]	4133	4,935	-75,350	1982-2016
35075040	INST AGR MACANAL	1300	4,974	-73,317	1982-2016
21255090	ARMERO GJA [21255090]	3241	5,005	-74,911	1987-2013
21255120	VILLAHERMOSA [21255120]	2069	5,017	-75,118	1979-1994
35075020	SUTATENZA [35075020]	1930	5,022	-73,449	1978-2016
26155110	APTO LA NUBIA [26155110]	2104	5,030	-75,470	1979-2016
26155170	TESORITO FCA [26155170]	2325	5,032	-75,438	1993-2016
54025020	APTO CONDOTO	65	5,074	-76,677	1979-2002
26145030	CAMELIA LA [26145030]	1736	5,079	-75,967	1979-2016
34035020	TAPON EL [34035020]	116	5,112	-69,148	1979-2013
54015010	PUEBLO RICO [54015010]	1505	5,233	-76,032	1979-2015
23025020	ESPERANZA LA [23025020]	208	5,263	-74,729	1979-2013
26145020	BELLAVISTA [26145020]	217	5,276	-75,800	1979-2017
23025040	ALBANIA [23025040]	788	5,286	-74,903	1988-2012
23125070	SAN CAYETANO [23125070]	2200	5,300	-74,067	1979-1999
35215010	APTO YOPAL [35215010]	325	5,320	-72,388	1978-2016
35075010	NUEVO COLON [35075010]	2438	5,353	-73,454	1978-2016
35085020	RONDON [35085020]	2120	5,358	-73,204	1978-2016
26185040	SAN FELIX [26185040]	2690	5,373	-75,375	1979-2013
24015120	ISLA DEL SANTUARIO	2580	5,467	-73,735	1978-2015
23035020	APTO PALANQUERO	172	5,471	-74,655	1979-2011
23065110	YACOPI [23065110]	1347	5,484	-74,355	1979-2016
24015220	VILLA CARMEN [24015220]	2600	5,509	-73,496	1978-2016

23125100	BUENAVISTA [23125100]	2200	5,515	-73,943	1994-2016
24035130	U P T C [24035130]	2690	5,543	-73,361	1979-2016
35095030	TUNEL EL [35095030]	3000	5,575	-72,948	1979-2012
24035040	COPA LA [24035040]	2700	5,579	-73,209	1992-2016
24015300	VILLA DE LEIVA [24015300]	2215	5,656	-73,544	1981-2016
24035340	APTO A LLERAS C [24035340]	2500	5,677	-72,968	1983-2015
26195020	ITA ANDES [26195020]	1180	5,691	-75,880	1979-2013
11045010	APTO EL CARANO	75	5,691	-76,644	1979-2017
26175030	NACIONAL GJA LA [26175030]	1153	5,717	-75,691	1979-2016
24035170	TUNGUAVITA [24035170]	2470	5,746	-73,116	1979-2016
23125060	ALBANIA [23125060]	1690	5,758	-73,913	1979-1999
24035150	BELENCITO [24035150]	2530	5,782	-72,894	1978-2016
24035180	SAN RAFAEL [24035180]	2548	5,783	-72,983	1978-2004
26175040	TUNEZ HDA [26175040]	604	5,800	-75,651	1979-2013
24035120	SURBATA BONZA	2485	5,802	-73,074	1978-2016
23075010	RIO CLARO [23075010]	449	5,856	-74,848	1986-2009
11025010	MANSA LA [11025010]	2018	5,878	-76,084	1979-2015
36015010	PAZ DE ARIPORO	342	5,879	-71,887	1996-2016
26185020	MESOPOTAMIA [26185020]	2408	5,886	-75,319	1978-2013
24025030	SIERRA LA [24025030]	2700	5,966	-73,164	1978-2016
27015260	SALADA LA [27015260]	1923	6,048	-75,625	1984-2013
23085040	SELVA LA [23085040]	2125	6,132	-75,415	1979-2013
23085220	SAN CARLOS [23085220]	1113	6,158	-75,039	1984-2013
24035250	CHITA [24035250]	2888	6,188	-72,466	1979-2016
27015070	A. OLAYA HERRERA	1516	6,221	-75,589	1967-2017
38015030	APTO PTO CARRENO	57	6,182	-67,491	1978-2017
56015010	PANAMERICANA [56015010]	4	6,223	-77,404	1978-2012
24025050	CHARALA [24025050]	1350	6,274	-73,151	1984-2017
27015210	VIVERO EL [27015210]	2400	6,283	-75,500	1981-1996
11075020	URRAO [11075020]	1833	6,298	-76,143	1979-2014
27015090	TULIO OSPINA [27015090]	1453	6,320	-75,553	1979-1999
24035330	BOAVITA [24035330]	2150	6,329	-72,582	1979-2016

23085210	VIOLETAS LAS [23085210]	1016	6,349	-75,003	1984-2011
11075010	HONDA LA [11075010]	1850	6,356	-76,158	1992-2011
24035240	SIERRA NEVAD COCUY	3716	6,410	-72,375	1978-2016
23095010	APTO PTO BERRIO	150	6,465	-74,412	1983-2013
24025040	ESC AGR MOGOTES	1673	6,470	-72,969	1979-2017
23085080	NUS GJA EXP EL [23085080]	859	6,484	-74,837	1979-2013
24035260	CAPITANEJO [24035260]	1160	6,521	-72,697	1979-2016
24025020	CUCHARO EL [24025020]	975	6,532	-73,199	1979-2010
26225030	COTOVE HDA [26225030]	534	6,534	-75,827	1978-2013
27015190	GUAYABITO [27015190]	1440	6,540	-75,147	1979-2012
24035310	CHISCAS [24035310]	2350	6,550	-72,505	1978-2016
23125040	CAMPO CAPOTE	180	6,616	-73,921	1979-2000
26225040	PIUNTI HDA [26225040]	1650	6,730	-75,913	1979-2013
23105030	VEGACHI [23105030]	990	6,774	-74,797	1990-2013
11115040	MUSINGA [11115040]	1396	6,778	-76,203	1985-2013
27015110	ARAGON [27015110]	2652	6,781	-75,561	1979-2015
24055030	ZAPATOCA [24055030]	1810	6,793	-73,283	1979-2017
24035270	TINAGA GJA [24035270]	2698	6,841	-72,708	1979-1999
24035400	VOLCAN EL [24035400]	2841	6,845	-72,678	2008-2017
37045010	SARAVENA [37045010]	148	6,946	-71,891	1981-2012
23175020	APTO OTU [23175020]	643	7,012	-74,716	1979-2013
23155030	APTO YARIGUIES	126	7,026	-73,809	1973-2017
27025030	ANORI [27025030]	1601	7,072	-75,151	1979-2013
24065030	TRIGUEROS HDA	400	7,077	-73,358	1996-2010
37055010	APTO ARAUCA [37055010]	128	7,069	-70,738	1981-2017
23195130	APTO PALONEGRO	1189	7,121	-73,185	1979-2016
26255020	STA ISABEL [26255020]	1132	7,157	-75,442	1979-2015
37015020	BERLIN [37015020]	3214	7,187	-72,869	1979-2017
37015010	SILOS [37015010]	2765	7,208	-72,753	1981-2012
23195090	VIVERO SURATA	1725	7,366	-72,988	1979-2017
16015020	ISER PAMPLONA	2340	7,373	-72,645	1979-2017
23195170	PROVINCIA [23195170]	109	7,403	-73,435	1979-1989

16015090	TAMA PARQUE NAL	2500	7,424	-72,442	1989-2002
23185010	VILLA LEIVA [23185010]	328	7,456	-73,537	1979-2017
23195200	CACHIRI [23195200]	1850	7,474	-72,991	1979-2017
16015100	RAGONVALIA [16015100]	1550	7,577	-72,484	2001-2017
12015060	TULENAPA [12015060]	39	7,774	-76,666	1982-2010
12015070	APTO LOS CEDROS	41	7,816	-76,718	1983-2017
12015020	UNIBAN [12015020]	43	7,826	-76,651	1979-2013
16025010	CARMEN DE TONCHALA	285	7,849	-72,566	1978-2017
23205050	CANELOS [23205050]	750	7,885	-74,241	1983-2017
16015010	APTO CAMILO DAZA	250	7,930	-72,509	1979-2015
23205030	STA ROSA D SIMITI	650	7,965	-74,059	1979-2017
26255040	CACAOTERAS DEL DIQ	55	7,983	-75,117	1978-2006
13015040	REPRESA URRRA [13015040]	300	8,014	-76,203	2005-2015
25025140	NECHI [25025140]	25	8,100	-74,767	1978-1991
16025040	CINERA-VILLA OLGA	100	8,168	-72,469	1979-2017
16055060	PLAYA LA [16055060]	1500	8,218	-73,235	1984-2017
23215030	AGUAS CLARAS [23215030]	208	8,229	-73,603	1979-2012
16055100	UNIV FCO P SANTAND	1150	8,238	-73,322	1992-2017
25025150	AYAPEL [25025150]	20	8,295	-75,165	1979-2016
16055010	APTO AGUAS CLARAS	1435	8,315	-73,358	1982-2017
25025190	PLANETA RICA [25025190]	90	8,399	-75,584	1978-2014
16055090	INS AGR CONVENCION	1076	8,471	-73,344	1990-2015
25025240	MAJAGUAL [25025240]	26	8,543	-74,627	1978-2009
12025030	MELLITO EL [12025030]	54	8,543	-76,673	1983-2013
16035010	TIBU [16035010]	50	8,638	-72,727	1978-2012
13075030	TURIPANA [13075030]	20	8,840	-75,802	1973-2015
25025090	APTO LAS FLORES	34	9,046	-73,971	1979-2017
25025180	SAN BENITO ABAD	20	9,164	-75,045	1991-2014
13085010	DOCTRINA LA [13085010]	20	9,297	-75,893	1978-2015
25025320	LOS ALAMOS [25025320]	25	9,304	-74,274	1985-2017
25025270	UNISUCRE [25025270]	160	9,316	-75,388	1984-2015
25025080	APTO RAFAEL BARVO	166	9,334	-75,283	1991-2015

25025250	CHIRIGUANA [25025250]	40	9,361	-73,593	1979-2015
13095020	PRIMATES [13095020]	200	9,530	-75,351	1985-2014
29015020	CARMEN DE BOLIVAR	152	9,716	-75,106	1981-2015
25025020	MONTERREY FORESTAL	25	9,732	-74,838	1992-2015
29035030	PRESA AY GRANDE	60	9,879	-75,327	1980-2016
28035040	GUAYMARAL [28035040]	50	9,905	-73,648	1979-2017
28025070	MOTILONIA CODAZZI	180	10,002	-73,249	1978-2017
29035110	SAN PABLO [29035110]	20	10,043	-75,259	1979-2015
28035010	VILLA ROSA [28035010]	70	10,191	-73,547	1979-2016
28025040	SAN JOSE D ORIENTE	850	10,350	-73,050	1978-1997
29035120	LIMON EL [29035120]	7	10,417	-75,067	1980-2002
28035030	APTO ALFONSO LOPEZ	138	10,436	-73,248	1983-2017
14015030	ESC NAVAL CIOH	1	10,447	-75,516	1982-2014
29035080	NORMAL MANATI	10	10,454	-74,955	1979-2014
29035070	REPELON [29035070]	10	10,490	-75,127	1981-2015
28015070	URUMITA [28015070]	255	10,566	-73,016	1978-2017
29065010	ZACAPA [29065010]	30	10,583	-74,250	1980-1990
29065020	PADELMA [29065020]	20	10,721	-74,200	1978-2017
29065030	PRADO SEVILLA	18	10,764	-74,155	1980-2014
29045020	A.E CORTISSOZ [29045020]	14	10,918	-74,780	1980-2016
15015060	SAN LORENZO [15015060]	2200	11,111	-74,055	1979-2017
15015050	APTO SIMON BOLIVAR	4	11,128	-74,229	1984-2017
15065050	CAMP INTERCOR	122	11,143	-72,515	1978-1989
15085030	ESC AGR CARRAIPIA	118	11,217	-72,360	1979-2017
15065010	APTO ALM. PADILLA	4	11,530	-72,918	1976-2017
15085040	RANCHO GRANDE	50	11,686	-71,833	1978-2016
15075060	PTO BOLIVAR [15075060]	10	12,224	-71,983	1986-2017
17025020	APTO EL EMBRUJO	7	13,360	-81,358	1980-2017

ANEXO 2

Tabla 15. Promedios mensuales y anuales multianuales de brillo solar expresados en h/día de las 276 estaciones seleccionadas del IDEAM.

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Anual
MANSA LA [11025010]	4,958	5,015	4,785	4,227	4,683	4,882	6,165	6,169	5,018	4,238	4,173	4,371	4,890
HONDA LA [11075010]	5,173	4,928	4,010	3,582	3,770	3,856	4,567	4,659	3,848	3,741	3,992	4,622	4,229
URRAO [11075020]	5,828	5,554	5,050	4,172	4,414	5,319	5,773	5,539	4,410		4,461	4,919	5,040
MUSINGA [11115040]	5,149	4,958	4,144	3,249	3,326	3,976	4,555	4,213	3,566	3,671	4,003	4,714	4,127
SEVILLA [21015020]	4,765	4,053	3,049	3,443	3,868	3,734	3,670	3,836	4,207	4,273	4,293	4,656	3,987
ALTAMIRA EL GRIFO	5,381	4,653	3,593	3,964	4,085	4,404	4,395	4,641	4,607	4,615	4,548	5,180	4,506
RESINA [21035020]	3,711	3,489	2,968	2,939	3,191	3,457	3,271	3,601	3,815	3,183	2,891	3,430	3,329
ESC AGR LA PLATA	4,998	4,421	3,679	3,706	3,878	3,939	3,813	3,997	4,279	4,255	4,205	4,747	4,160
STA LETICIA [21055030]	4,124	3,544	2,644	2,429	2,557	2,540	2,404	2,629	3,061	3,085	3,256	3,905	3,015
TOEZ [21055040]	4,529	3,885	3,466	2,850	3,311	3,300	3,106	3,257	3,154	3,010	3,451	4,192	3,459
ZULUAGA [21065040]	4,038	3,617	2,659	2,575	2,807	2,844	2,993	2,870	3,196	3,094	3,210	3,564	3,122
SAN RAFAEL [21085030]	4,847	4,245	3,542	3,638	3,858	4,207	3,929	4,031	4,312	4,136	3,683	4,245	4,056
JUNCAL EL [21095010]	6,443	5,568	4,547	4,733	5,220	5,515	5,469	5,430	5,156	5,257	5,502	6,058	5,408
ROSALES LOS [21105050]	5,711	5,089	4,137	4,218	4,316	4,579	4,528	4,578	4,483	4,756	4,728	5,084	4,684
PALACIO-VEGALARGA	5,171	4,528	3,639	3,524	3,973	4,389	4,571	4,586	4,192	3,898	3,621	4,492	4,215
STA MARIA [21125010]	5,274	4,708	3,755	3,768	4,419	4,541	4,757	4,742	4,806	3,997	3,847	4,716	4,444
JABALCON [21135020]	6,775	5,869			4,954	5,308	5,819	5,996	5,724	5,777	5,658	6,218	5,810
ANCHIQUE [21135030]	7,391	6,618	5,763	5,815	6,238	6,408	6,799	6,806	6,447	6,316	6,352	6,790	6,479
SAN ALFONSO [21145040]	5,054	4,771	4,098	4,609	4,963	4,921	5,333	5,358	5,160	4,803	4,421	4,237	4,811
DOLORES HDA MADRON	6,184	5,479	4,555	4,556	5,126	5,877	6,020	6,092	5,204	4,752	4,694	5,512	5,337
PST DE MONTA [21165010]	6,532	5,874	4,819	4,487	4,669	5,283	5,777	5,906	5,504	5,717	5,666	5,998	5,519
LOZANIA [21165030]	6,223	5,512	4,421	3,954	4,388	4,850	5,359	5,297	4,775	4,875	5,267	5,865	5,066
NATAIMA [21185020]	6,218	5,700	5,180	5,071	5,508	5,766	6,309	6,508	6,013	5,665	5,572	5,818	5,777
GUAMO [21185030]	6,345	5,671	4,765	4,688	5,048	5,398	5,846	5,950	5,566	5,538	5,498	5,566	5,490
APTO SANTIAGO VILA	6,451	6,077	5,409	5,414	5,697	5,954	6,377	6,433	6,149		6,094	6,388	6,040
PANDI [21195060]	6,154	5,523	4,563	4,153	4,326	4,629	4,942	4,682	4,342	4,647	5,142	5,887	4,916
ITA VALSALICE [21195120]	5,939	5,093	4,163	3,811	3,743	4,222	4,209		4,539	4,767	4,571	4,987	4,549

TIBAITATA [21205420]	6,177	5,349	4,383	3,663	3,530	3,918	4,359	4,590	4,418	4,261	4,385	5,418	4,538
FLORIDA LA [21205670]	3,750	3,361	2,607	2,222	2,349	2,720	3,056	3,546	3,406	2,598	2,250	3,137	2,917
SAN JORGE GJA [21205720]	5,442	5,077		3,921	4,306	4,839	5,343	5,352	5,077	4,124	4,055		4,754
BASE AEREA MADRID	6,070	5,436	4,547	3,738	3,543	3,992	4,296	4,492	4,298	4,134	4,191	5,258	4,500
CAJAMARCA [21215100]	5,061	4,874	4,459	3,841	3,970	4,024	4,395	4,314	4,370	4,159	4,304	4,873	4,387
CEMENTOS DIAMANTE	6,582	5,689	5,038	4,952	5,582	5,764	6,468	6,343	5,727	5,459	5,800	6,058	5,788
PERALES HATO OPIA	5,950	5,156	4,632	4,397	5,089	5,626	6,244	6,366	5,804	5,056	4,802	5,378	5,375
APTO PERALES [21245040]	5,773	5,172	4,451	4,520	5,007	5,611	6,201	6,291	5,959	5,148	4,649	5,247	5,336
SALTO EL [21255080]	6,264	5,638	4,896	4,867	5,415	5,646	6,363	6,318	5,772	5,391	5,590	5,908	5,672
ARMERO GJA [21255090]	6,593	5,964	5,226	5,252	5,634	6,373	6,970	6,974	6,386	5,909	6,034	6,170	6,124
VILLAHERMOSA [21255120]	4,275	3,846	3,619	3,674	4,380	5,372	6,112	5,990	5,032	3,928	3,643	4,134	4,500
QUINTA LA [21255140]	6,617	6,143			5,637	6,276		7,041	6,515	5,991	6,087	6,391	6,300
GARCIA HDA [21255150]	6,789	6,327	5,418	5,498	5,978	6,563	7,169	7,083	6,655	6,132	6,319	6,509	6,370
APTO PLANADAS	4,659	4,226		3,606	3,980	4,075	3,897	4,086	4,024	3,121	3,952	4,971	4,054
DEMOSTRACION GJA	5,965	5,543	4,763	4,904	5,454	5,696	5,804	5,851	5,580	5,161	4,910	5,756	5,449
MESA DE POLE [22055020]	4,689	4,265	3,955	3,707	4,182	4,492	4,542	4,573	4,300	3,942	4,067	4,418	4,261
SAN ANTONIO QUINTA	5,563	4,957	4,359	4,101	4,795	4,865	5,065	5,224	5,048	4,838	4,470	5,338	4,885
ESPERANZA LA [23025020]	6,518	5,808	4,862	4,933	5,711	6,006	6,761	6,615	6,013	5,570	5,745	6,097	5,886
ALBANIA [23025040]	5,706	5,445	4,608	4,872	4,957	5,617	6,167	6,413	5,852	5,347	4,972	5,109	5,422
APTO PALANQUERO	4,529	4,018	3,914	4,610	5,207	5,139	6,113	6,047	5,492	4,925	5,001	4,410	4,950
YACOPI [23065110]	4,985	4,282	3,488	3,595	4,296	5,285	6,158	5,673	4,647	4,378	4,473	4,627	4,657
RIO CLARO [23075010]	4,722	4,282	3,288	4,088	4,670	5,463	6,428	5,823	4,867	4,419	4,472	4,501	4,752
SELVA LA [23085040]	5,098	4,892	4,269	3,796	4,355	5,599	6,629	6,355	5,081	3,887	3,993	4,579	4,878
NUS GJA EXP EL [23085080]	5,876	5,562	4,220	4,564	5,290	6,196	6,885	6,688	5,824	5,172	4,887	5,202	5,531
VIOLETAS LAS [23085210]	4,891	5,067	4,312	4,547	4,897	5,559	6,393	6,202	5,697	4,754	4,336	4,162	5,068
SAN CARLOS [23085220]	4,331	4,188	3,530	3,503	4,486	5,321	6,409	6,171	5,017	4,018	3,582	3,864	4,535
APTO PTO BERRIO	6,959	6,156	4,627	5,303	5,919	6,643	7,312	7,171	6,197	5,776	6,057	6,477	6,216
VEGACHI [23105030]	5,844	5,215	3,958	4,006	4,524	5,602	6,370	6,311	5,307	4,805	4,837	5,159	5,161
CAMPO CAPOTE	5,944	5,651	4,437	4,618	5,266	5,744		6,097	5,687	5,123	5,173	5,560	5,391
ALBANIA [23125060]	4,613	4,075	3,198	2,747	3,217	3,239	4,305	4,369	4,105	3,498	3,578	4,359	3,775
SAN CAYETANO [23125070]	5,261	4,589	3,634	3,057	3,372	4,340	4,758	4,580	4,132	3,892	4,072	5,243	4,244
BUENAVISTA [23125100]	3,174	2,594	1,923	1,395	1,760	2,340	2,870	2,465	2,458	2,475	2,074	2,627	2,346

APTO YARIGUIES	7,150	6,363	4,957	4,884	5,328	5,927	6,802	6,660	6,072	5,426	5,567	6,296	5,953
APTO OTU [23175020]	5,651	5,052	4,020	3,793		5,198		5,793	4,886	4,191	4,476	5,163	4,822
APTO PALONEGRO	6,829	5,912	4,736	4,582	4,779	4,871	5,355	5,307	5,040	4,879	4,919	5,834	5,254
ISLA DEL SANTUARIO	7,400	6,663	5,589	4,550	4,409	4,763	5,357	5,318	5,114	4,849	5,319	6,441	5,481
VILLA CARMEN [24015220]	7,077	6,508	5,644	4,845	4,983	5,190	5,677	5,670	5,605	5,199	5,348	6,219	5,664
VILLA DE LEIVA [24015300]	6,309	5,695	4,817	4,055	4,226	4,701	5,126	5,077	4,550	4,122	4,323	5,361	4,864
CUCHARO EL [24025020]	7,340	6,795	6,053	5,666	5,811	6,082	6,682	6,536	6,002	5,580	6,326	6,935	6,317
SIERRA LA [24025030]	4,924	4,399	3,393	2,639	2,754	3,358	3,779	3,899	3,644	2,899	3,007	4,024	3,560
ESC AGR MOGOTES	6,879	6,326	5,519	4,730	4,758	5,059	5,748	5,708	5,303	4,936	5,297	6,278	5,545
CHARALA [24025050]	6,886	6,278	5,218	4,747	4,564	4,765	5,247	5,240	4,954	5,090	5,467	6,322	5,398
COPA LA [24035040]	7,035	6,511	5,105	4,096	3,775	4,305	4,608	4,555	4,322	4,420	4,986	6,136	4,988
SURBATA BONZA	6,718	5,719	5,039	4,219	4,245	4,476	4,839	4,630	4,226	4,048	5,018	6,250	4,952
U P T C [24035130]	7,413	6,727	5,623	4,701	4,347	4,308	4,622	4,918	5,079	5,000	5,362	6,630	5,394
BELENCITO [24035150]	6,633	5,585	4,695	3,508	3,900	4,297	4,713	4,312	3,951	3,692	4,519	5,837	4,637
TUNGUAVITA [24035170]	6,585	5,794	4,840	3,591	3,414	3,613	4,101	3,879	3,783	3,893	4,604	5,814	4,493
SAN RAFAEL [24035180]	6,759	5,846	5,247	4,001	3,924	4,473	5,028	4,714	4,448	4,223	5,069	6,185	4,993
CAPITANEJO [24035260]	7,892	7,443	6,902	6,160	6,198	6,184	6,783	6,793	6,285	6,030	6,528	7,447	6,720
ZAPATOCA [24055030]	6,474	5,931	5,350	4,412	4,563	3,818	5,391	5,864	5,463	4,721	4,739	5,698	5,202
TRIGUEROS HDA	7,036	6,358	5,156	4,749	5,203	5,367	6,093	6,047	5,856		5,673	6,291	5,803
GABRIEL LOPEZ	2,347	1,848	1,736	1,483	1,449	1,087	1,256	1,516	1,734	1,515	1,504	1,798	1,606
POTRERITO [26055050]	5,967	5,688	5,785	5,019	5,289	5,882	6,631	6,555	5,871	5,087	5,338	5,483	5,716
UNIV DEL VALLE	5,494	5,165	4,939	4,641	4,539	5,227	6,036	5,965	5,142	4,570	4,460	4,910	5,091
ING CAUCA [26065010]	5,441	5,312	4,716	4,467	4,319	4,618	5,202	5,296	4,668	4,684	4,738	4,962	4,869
MIRANDA [26065020]	4,886	4,491	3,980	3,519	3,395	3,799	4,440	4,464	3,944	3,743	3,875	4,227	4,064
PALMIRA ICA [26075010]	5,411	5,259	4,616	4,489	4,315	4,759	5,593	5,526	4,945	4,665	4,695	5,201	4,956
APTO A BONILLA	5,825	5,533	5,185	4,832	4,600	5,105	5,841	6,044	5,531	5,056	5,038	5,311	5,325
GJA EXP HOESCHST	5,417	5,204	4,937	4,727	4,364	4,598	5,607	5,991	5,225	4,896	4,728	4,485	5,015
TENERIFE [26095080]	4,884	4,473	3,891	3,181	3,369	4,137	4,493	4,455	3,994	3,365	3,322	4,032	3,966
VINCULO EL [26095230]	5,630	5,540	5,061	4,562	4,541	5,147	5,875	5,679	4,816	4,763	5,029	5,257	5,158
TIERRABLANCA [26115030]	6,074	5,730	5,924	4,540	5,128	5,700	6,788	6,188	5,649	4,628	5,309	5,640	5,608
CENT ADMO LA UNION	4,873	4,791	4,952	4,331	4,421	4,647	5,891	5,922	4,946	4,325	4,329	4,420	4,821
APTO EL EDEN [26125060]	5,522	5,173	4,430	4,286	4,088	4,691	5,795	6,128	5,036	4,403	4,442	4,836	4,903

CUMBARCO [26125130]	4,080	3,751	3,197	2,895	2,999	3,779	4,550	4,589	3,604	2,812	2,890	3,353	3,542
APTO MATECANA	6,085	5,668	4,918	4,440	4,446	5,030	5,888	5,945	5,099	4,615	4,949	5,391	5,206
BOHEMIA LA [26135100]	6,454	5,853	5,482	4,649	4,662	5,019	5,921	6,040	5,424	4,833	5,126	5,707	5,431
VERACRUZ [26135110]	4,501	4,297	3,619	3,150	3,176	3,786	4,503	4,206	3,605	3,429	3,684	4,024	3,832
BELLAVISTA [26145020]	4,307	4,233	3,516	2,969	3,230	4,003	5,072	5,074	3,934	3,236	2,946	3,396	3,826
CAMELIA LA [26145030]	5,057	4,849	4,263		3,708	4,302	5,453	5,521	4,641	3,484	3,599	4,106	4,453
APTO LA NUBIA [26155110]	5,411	4,822	4,149	3,463	3,460	4,006	4,817	4,504	3,829	3,430	3,707	4,564	4,180
BRISAS LAS [26155150]	3,160	2,919	2,288	1,521	1,703	2,455	3,533	3,192	2,186	1,525	1,935	2,668	2,424
TESORITO FCA [26155170]	4,379	3,856	3,044	2,632	2,609	3,302	4,040	3,726	2,988	2,932	3,041	4,003	3,379
NACIONAL GJA LA [26175030]	6,274	6,131	5,435	4,494	4,245	5,194	6,197	6,121	5,073	4,275	4,671	5,340	5,287
TUNEZ HDA [26175040]	6,423		5,663	4,863	5,174	5,914	6,593		5,589	5,065	5,484	5,863	5,663
MESOPOTAMIA [26185020]	5,523	5,082	4,449	3,947	4,605	5,827	6,934	6,685	5,474	3,970	4,059	4,850	5,117
SAN FELIX [26185040]	5,003	4,628	3,864	3,058	3,711	4,973	5,857	5,409	4,544	3,423	3,077	4,115	4,305
ITA ANDES [26195020]	5,328	5,271	4,206	3,843	3,952	4,592	5,522	5,062	4,192	3,956	4,389	4,627	4,578
COTOVE HDA [26225030]	7,148	6,892	5,949	5,400	5,409	6,192	6,929	6,499	5,598	5,225	5,788	6,180	6,101
PIUNTI HDA [26225040]	4,226	4,020	3,611	2,842			4,014	4,215	3,404	2,758	2,836	3,083	3,501
STA ISABEL [26255020]	3,902	3,536	2,952	2,704	3,327	3,861	4,722	4,446	3,728	3,398	4,028	3,904	3,709
A.OLAYA HERRERA	5,555	5,345	4,674	4,161	4,514	5,565	6,456	6,096	5,040	4,300	4,499	4,932	5,095
TULIO OSPINA [27015090]	6,003	5,332	5,144	4,361	4,820	5,840	6,704	6,192	5,254	4,281	4,649	5,296	5,323
ARAGON [27015110]	5,177	4,816	3,997	3,332	3,731	5,212	6,160	5,713	4,447	3,530	3,724	4,440	4,523
GUAYABITO [27015190]	5,482	5,002	4,033	4,023	4,524	5,635	6,471	6,219	4,825	3,977	4,226	4,673	4,924
VIVERO EL [27015210]	4,419	4,353	3,632	3,151	3,964	5,587	6,699	5,953	4,540	3,105	3,061	3,501	4,330
SALADA LA [27015260]	4,517	4,582	3,784	2,986	3,337	4,062	5,207	4,967	4,002	3,566	3,556	3,825	4,033
ANORI [27025030]	4,480	4,002	3,135	2,941	3,733	4,941	5,946	5,435	4,045	3,407	3,446	3,675	4,099
VALENCIA [44015030]	3,859	3,328	2,619	2,382	2,392	2,577	2,558	2,741	2,926	2,861	3,020	3,545	2,901
MOCOA ACUEDUCTO	3,195	2,831	2,506	2,650	2,467	2,196	2,239	2,909	3,621	3,789	3,593	3,505	2,958
APTO G ARTUNDUAGA	5,654	4,338	3,389	3,459	3,540	3,283	3,355	4,087	4,816	4,823	4,923	5,452	4,260
MACAGUAL [44035030]	5,433	4,324	3,263	3,330	3,491	3,222	3,464	4,267	4,852	4,800	4,853	5,380	4,223
VALPARAISO [44045020]	5,534	4,001	3,215	3,392	3,344	2,908	3,171	3,946	4,723	4,645	5,008	5,603	4,124
MONO LA [4404503]	5,281	4,134	3,248	3,254	3,302	3,147	3,252	3,908	4,801	4,798	4,679	5,080	4,074
MICHOACAN [47015040]	3,149	2,570	1,934	1,871	1,703	1,100	1,180	1,684	2,126	2,809	3,261	3,134	2,210
PTO UMBRIA [47015070]	4,446	3,566	2,748	3,024	2,868	2,694	2,848	3,776	4,191	4,507	4,297	4,533	3,625

MONOPAMBA [47015080]	2,652	1,950	1,534	1,681	1,707	1,267	1,259	1,497	1,969	2,576	3,086	2,766	1,995
PRIMAVERA LA [47015090]	3,271	2,700	2,187	2,109	2,038	1,740	1,847	2,064	2,452	2,959	3,453	3,526	2,529
ENCANO EL [47015100]	3,079	2,667	1,947	2,020	1,991	2,013	2,103	2,184	2,466	2,859	3,082	3,170	2,465
PUEBLO RICO [54015010]	4,119	3,666	3,050	2,875	3,206	3,515	4,003	3,945	3,049	3,049	3,413	3,873	3,480
SAN JOSE PALMAR	1,690	1,633	1,911	2,178	2,907	3,082	3,782	3,555				1,983	2,525
ARGELIA EL RECREO	4,054	3,923	3,681	3,737	3,711	4,216	5,216	5,176	4,225	3,385	3,519	3,743	4,049
APTO EL CARANO	2,787	2,838	2,702	3,132	3,533	3,781	4,199	4,205	3,818	3,742	3,614	3,035	3,449
VENTA DE CAJIBIO	4,343	4,080	3,592	3,448	3,790	4,771	5,617	5,542	4,384	3,722	3,444	3,380	4,176
APTO G L VALENCIA	5,112	4,584	3,869	3,695	3,772	4,878	5,647	5,409	4,554	3,748	3,890	4,500	4,471
CARPINTERIAS HDA	3,116	3,235	2,861	3,419	3,596	4,736	5,812			3,534	2,070	2,635	3,502
GRANJA EL MIRA	2,569	2,930	3,343	3,364	2,705	2,017	2,726	2,448	1,940	2,105	1,883	2,021	2,504
RICAURTE [51025020]	2,083	2,238	2,394	2,248	2,503	2,685	3,645	3,710	2,881	2,309	2,425	2,471	2,633
ALTAQUER [51025050]	1,636	1,809	1,942	2,359	2,285	2,287	2,767	2,621	1,816	1,800	1,717	1,454	2,041
FONDA LA CITEC	5,975	5,622	5,153	5,196	5,336	5,961	6,471	6,462	5,618	5,480	5,193	5,637	5,675
BOLIVAR [52025010]	5,044	4,598	3,957	4,057	4,231	5,357	6,066	6,217	5,173	4,504	3,906	4,436	4,796
MILAGROS LOS [52025020]	4,449	4,057	3,542	3,795	4,316	5,085	5,577	5,568	4,692	4,218	3,987	4,186	4,456
MERCADERES [52025030]	5,537	5,208	4,718	4,556	4,740	5,417	6,263	6,319	5,688	5,323	4,846	4,984	5,300
SIERRA LA [52025050]	4,384	3,910	3,411	3,357	3,630	4,496	5,366	5,447	4,547	3,790	3,291	3,786	4,118
OBONUCO [52045010]	3,635	3,114	2,625	2,835	3,137	3,419	3,650	3,642	3,316	3,340	3,470	3,523	3,309
APTO ANTONIO NARIÑO	5,391	4,889	4,328	4,826	5,108	6,172	6,666	6,692	5,774	5,174	5,012	5,137	5,431
SAN BERNARDO	4,022	3,564	3,050	3,473	3,713	4,449	5,074	5,231	4,500	3,858	3,343	3,591	3,989
APTO SAN LUIS [52055010]	4,207	3,685	3,151	3,698	4,038	4,273	4,370	4,468	4,318	4,166	4,099	4,151	4,052
PARAISO EL [52055020]	3,681	3,197	2,668	2,937	3,307	3,962	4,259	4,262	3,758	3,543	3,579	3,783	3,578
BOMBONA [52055030]	4,680	4,349	3,852	4,134	4,472	5,176	5,765	5,923	5,166	4,590	4,489	4,548	4,762
BOTANA [52055040]	3,357	3,210	2,496	2,766	2,949	3,020	3,684	4,052	3,951	3,467	3,422	2,806	3,265
SINDAGUA [52055090]	3,956	3,689	3,080	3,342	3,677	4,181	5,014	5,130	4,488	4,007	3,713	3,747	4,002
BARBACOAS [52065020]	3,032	3,188	3,443	3,864	3,404	3,086	3,258	2,820	2,154	2,280	2,373	2,600	2,959
BONANZA [53045010]	2,496	2,688	3,178	3,183	2,879	2,534	2,922	2,962	2,300	2,312	2,309	2,440	2,684
APTO GUAPI [53045030]	2,662	2,921	3,391	3,703	2,896	2,590	2,874		2,593	2,538	2,273	2,431	2,807
COLPUERTOS [53115020]	3,900	3,975	3,808	3,843	3,837	3,883	4,363	4,093	3,662	3,583	3,632	3,565	3,845
APTO CONDOTO	2,660	2,515	2,396	2,507	3,279		3,574	3,471	2,917	2,859	3,010	2,572	2,887
BAJO CALIMA [54075020]	2,863	2,848	2,414	2,780	2,642	2,511	2,746	2,715	2,311	2,260	2,488	2,742	2,610

MISION LA [54075040]	2,448	2,832		2,770	2,643	2,526	2,767	2,807	2,203	2,258	2,206	2,237	2,518
NOANAMA [54085010]	2,319	2,609	2,469	2,712	2,941	2,847	3,370	3,104	2,443	2,369	2,565	2,322	2,673
PANAMERICANA [56015010]	2,486			2,337	2,059	1,695	2,514	2,263	1,747	1,881	1,648	1,557	2,019
LEGIOSA LA [21145070]	5,302	4,644	3,339	3,018	2,901	2,361	2,760	3,517	4,496	4,369	4,119	4,757	3,799
OBS MET NACIONAL	5,251	4,452	3,938	2,770	2,992	3,265	3,764	4,079	3,745	3,231	3,414	4,587	3,791
ELDORADO DIDACTICA	5,836	5,086	4,408	3,401	3,352	3,638	4,130	4,203	3,992	3,742	4,065	5,153	4,250
APTO EL DORADO	6,019	5,243	4,388	3,516	3,454	3,953	4,308	4,375	4,106	3,835	4,236	5,149	4,382
PROVIDENCIA GJA	5,143	4,496	3,080	2,507	2,382	2,593	2,842	2,910	3,044	3,170	3,661	3,411	3,270
ESC COL INGENIERIA	5,678	4,798	3,902	3,011	3,107	3,282	3,665	3,502	3,290	3,392	3,863	4,911	3,867
SABANETA [23065100]	4,398	4,158	3,357	3,314	3,659	4,111	4,453	4,647	4,149	3,573	3,477	3,836	3,928
SIERRA NEVAD COCUY	7,196	6,369	5,210	3,493	3,186	3,960	4,737	4,472	3,733	3,313	4,190	5,917	4,648
CHITA [24035250]	7,868	7,079	5,797	4,269	3,683	3,504	3,368	3,697	4,192	4,352	4,971	6,952	4,978
TINAGA GJA [24035270]	6,732	5,889	5,591	4,440	4,197	3,823	4,864	4,625	4,568	4,288	4,984	6,130	5,011
CHISCAS [24035310]	7,844	7,034	5,985	4,814	4,567	4,233	5,003	5,091	4,717	4,733	5,458	6,899	5,532
BOAVITA [24035330]	7,818	7,043	6,086	4,726	4,349	4,695	5,160	5,122	4,903	4,984	5,642	6,845	5,614
APTO A LLERAS C [24035340]	7,536	6,731	5,614	4,424	4,173	4,646	4,938	4,686	4,636	4,547	5,466	6,580	5,331
VOLCAN EL [24035400]	6,535	5,663	4,880	3,533	3,363	3,605	3,494	3,755	3,475				4,256
TRUENO EL [31015010]	5,798	5,110	3,896	3,401	3,227	3,051	3,268	3,887	4,787	4,700	4,568	4,864	4,213
PTO INIRIDA [31095010]	6,868	6,384	5,416		3,849	4,121	4,511	5,145	5,683	5,661	5,634	5,964	5,385
MACARENA LA [32035010]	7,055	5,775	4,343	3,654	3,846	3,374	3,759	4,383	4,991	5,112	5,488	6,409	4,849
VISTA HERMOSA		5,248	3,740	3,530	3,714	3,387	3,779	4,250		4,979	5,203	5,979	4,381
HOLANDA LA [32075040]	6,323	5,449	3,878	3,640	4,159	4,118	3,987	4,359	5,098	5,191	5,426	6,255	4,824
MESETAS [32075050]	5,723	4,917		3,530	3,652	3,741			4,724	4,601	4,773	5,608	4,585
PTO LLERAS [32075080]	6,384	5,375	3,775	3,380	3,488	3,089	3,360	3,890	4,697	4,717	4,751	5,679	4,382
SAN JOSE GUAVIARE	6,059	5,451	4,447	3,944	3,482	3,244	3,667	4,259	5,220	5,009	4,868	5,216	4,572
CARIMAGUA [33035010]	8,558	7,367	5,602	4,540	4,190	3,942	4,166	4,661	5,098	5,663	6,381	7,697	5,656
CUMARIBO [33055010]	7,616	7,084	5,594	4,418	3,815	3,596	3,854	4,218	5,111	5,490		7,026	5,256
TAPON EL [34035020]		7,448	6,379	4,773	3,730	3,803	3,985	4,294	4,890			7,204	5,167
SAN CARLOS GUAROA	6,678		4,373		4,146	3,814	3,985	4,353		5,158	5,424	6,700	4,959
BARBASCAL [35015050]	6,740	5,990	4,222	4,171	4,296	4,083	4,226	4,711	5,305	5,418	5,814	6,085	5,088
LIBERTAD LA [35025020]	6,619	5,572	4,033	3,901	4,394	3,631	4,181	4,774	5,038	5,262	5,717	6,504	4,969
BOLSA LA [35025060]	4,859	4,011	3,136	1,896	2,012	1,874	1,676			2,909	2,907	4,363	2,964

APTO VANGUARDIA	5,485	4,728	3,585	3,687	3,922	3,728	3,760	4,358	5,088	5,215	4,834	5,317	4,476
CABAÑA LA HDA	5,616	4,964	3,613	3,494	3,455	3,174	3,292	3,986	4,861	4,788	4,924	5,563	4,311
JAPON EL [35055010]	5,803	4,896	3,544	3,345	3,522	3,136	3,455	4,120	5,089	4,944	4,772	5,292	4,327
GACHETA [35065010]			3,715		2,892	2,562	2,855	2,976	3,569	3,703	4,035	4,632	3,438
NUEVO COLON [35075010]	6,282	5,664	4,742	3,605	3,285	2,719	2,870	3,127	4,006	4,375	4,895	5,788	4,280
SUTATENZA [35075020]	6,434	5,764	4,370	3,663	3,480	2,980	3,075	3,440	4,395	4,628	5,089	5,964	4,440
INST AGR MACANAL	5,956	5,051	3,850	3,142	3,116	2,692	2,750	2,987	4,024	4,518	4,788	5,591	4,039
RONDON [35085020]	5,743	5,052	4,171	3,018	2,746	1,941	1,945	2,311	3,635	4,162	4,442	4,497	3,639
TUNEL EL [35095030]	7,781	6,745	5,568	4,423	4,471	4,282	4,502	4,382	4,513	4,658		6,857	5,289
HUERTA LA GRANDE	7,308	6,629	4,652	4,159	4,257	4,208	4,321	4,987	5,455	5,683	6,146	6,251	5,338
BARRANCA DE UPIA	6,857	6,266	4,271	4,572	4,565	3,680	4,519	4,988	5,770	5,805	5,829	6,525	5,304
GUAICARAMO [35105050]	7,208	6,689	4,742	4,176	4,230	4,072	4,199	4,650	5,723	6,071	6,270	6,915	5,412
MARGARITAS LAS HDA	7,205	6,889	5,241	4,302	4,161	4,141	4,202	4,522	5,329	5,610	5,915	6,788	5,359
APTO YOPAL [35215010]	8,103	6,968	5,058	4,310	4,604	4,262	4,401	4,794	5,499	5,779	6,298	7,728	5,650
MODULOS [35225020]	8,131	6,960	5,105	4,463	4,129	4,093	4,169	4,504	5,219	5,524	6,151	7,478	5,494
PAZ DE ARIPORO	8,270	7,189	5,334	4,401	4,718	4,786	4,961	5,437	6,210	6,437	6,944	7,732	6,035
SILOS [37015010]	5,183	4,762	3,694	2,507	2,270	2,204	2,964	3,365	3,400	3,024	3,392	4,301	3,422
BERLIN [37015020]	7,142	6,422	5,206	3,814	3,514	3,498	3,970	4,415	4,348	4,192	4,963	6,378	4,822
SARAVENA [37045010]	4,956			2,766	3,381	3,237	3,743	4,130	4,713	5,030	4,939	4,885	4,178
APTO ARAUCA [37055010]	8,731	8,113	6,492	5,334	4,970	4,536	4,713	5,307	5,958	6,493	7,002	8,013	6,305
APTO PTO CARRENO	8,394	8,056	7,152	5,651	4,616	4,105	4,468	4,749	5,403	6,276	6,882	7,605	6,113
ARARACUARA [44135010]	5,039	4,965		4,064	3,832	3,816	4,529	5,206	5,401	5,205			4,673
MAGUARE [46035010]	6,024	4,610	3,206	3,173	3,366	3,038	3,217	4,140	4,943	4,797	5,020	5,870	4,284
PUERTO RICO [46035020]	5,077	3,961	3,039	2,888	2,918	2,519	2,691	3,557	4,313	4,162	4,337	5,162	3,719
PTO LEGUIZAMO	5,226	4,206	3,272	3,157	3,249	3,174	3,510	4,262	4,763	4,730	4,942	5,009	4,125
A VASQUEZ COBO	4,203	4,021	4,179	4,755	4,771	5,036	6,001	6,480	5,951	5,515	5,212	4,521	5,054
UNIBAN [12015020]	5,235	4,902	3,973	3,596	3,880	3,178	4,182	4,310	3,966	4,362	4,529	4,396	4,209
TULENAPA [12015060]	5,897	5,393	4,307	4,015	4,207	4,210	4,808	4,692	4,507	4,940	5,005	5,206	4,765
APTO LOS CEDROS	5,792	5,473	4,548	4,197	3,846	3,753	4,199	4,383	4,327	4,687	4,700	4,739	4,554
MELLITO EL [12025030]	5,960	5,573	4,680	4,063	3,877	3,911	4,384	4,460	4,279	4,570	5,021	5,090	4,656
REPRESA URRRA [13015040]	5,552	5,338	4,082	4,083	4,072	4,506	5,376	5,055	4,814	5,247	5,371	5,420	4,910
TURIPANA [13075030]	7,317	6,532	5,133	4,137	4,088	4,741	5,536	5,130	4,393	4,661	5,332	6,109	5,259

DOCTRINA LA [13085010]	7,731	7,178	6,015	5,179	4,470	4,740	5,601	5,429	4,614	4,514	5,128	6,517	5,593
PRIMATES [13095020]	5,533	6,192	5,864	4,662	3,853	4,248	4,903	4,500	4,422	4,012	4,083	4,778	4,754
ESC NAVAL CIOH	9,156		7,471	6,889	6,262	6,832	6,747	6,760	5,820	5,745	6,588	8,047	6,938
APTO SIMON BOLIVAR	9,168	8,827	8,031	7,614	7,122	7,585	7,525	7,141	6,761	6,614	7,312	8,623	7,693
SAN LORENZO [15015060]	3,087	2,944	2,840	2,553	2,515	2,861	3,315	3,098	2,424	1,756	1,774	2,453	2,635
APTO ALM. PADILLA	8,493	8,099	7,324	6,597	6,333	7,817	8,443	8,099	6,868	6,643	7,170	7,769	7,471
CAMP INTERCOR	8,751	7,861	7,519	6,028	6,114	6,745	8,018	7,750		6,086	7,665	7,299	7,258
PTO BOLIVAR [15075060]	9,062	9,225	8,787	8,208	7,879	8,255	8,985	9,125	7,975	7,304	7,655	8,419	8,407
ESC AGR CARRAIPIA	7,161	6,692	5,876	4,702	4,699	5,887	7,016	6,710	5,939	5,622	6,172	6,441	6,076
RANCHO GRANDE	8,909		8,321	7,038	7,136	7,781	8,486	8,491	7,519	6,766	7,371	8,040	7,805
APTO CAMILO DAZA	6,507	5,988	4,957	4,866	5,811	5,947	6,547	7,006	6,638	6,264	6,255	6,303	6,091
ISER PAMPLONA	5,156	4,587	3,905	3,208	3,480	3,685	4,096	4,549	4,486	4,047	4,028	4,659	4,157
TAMA PARQUE NAL	4,599	4,051	3,686	2,655	2,327	2,421	2,864	3,014	3,001	2,886	3,246	3,456	3,184
RAGONVALIA [16015100]	5,261	4,609	3,599	3,218	3,982	3,304		5,555	5,068	4,578	4,370	4,471	4,365
CARMEN DE TONCHALA	4,574	4,285	3,503	3,476	4,531	4,856	5,525	6,057	5,759	5,035	4,522	4,366	4,708
CINERA-VILLA OLGA	5,031	4,660	3,432	3,573	5,218	5,830	6,495	6,872	6,139	5,712	5,077	4,276	5,193
TIBU [16035010]	5,048	4,871	3,882	3,998	5,079	5,997	6,676	6,798	6,042	5,335	4,859	4,278	5,238
APTO AGUAS CLARAS	6,922	6,223	5,109	4,421	4,660	5,876	6,623	5,938	5,117	4,811	5,122	6,069	5,574
PLAYA LA [16055060]	5,876	5,719	4,649	4,093	4,535	5,873	6,617	6,280	4,941	4,564	4,611	5,229	5,249
INS AGR CONVENCION	5,283	4,833	4,047	3,784	4,795	6,260	6,958	6,658	5,520	5,067	4,959	4,500	5,222
UNIV FCO P SANTAND	5,739	5,319	4,059	3,586	4,009	5,128	5,849	5,304	4,358	4,256	4,009	4,770	4,699
APTO EL EMBRUJO	7,431	8,263	8,668	8,965	7,683	6,499	7,078	7,631	6,645	6,100	5,854	6,525	7,279
VILLA LEIVA [23185010]	7,384	6,535	4,956	4,652	5,097	5,640	6,416	6,334	5,748	5,337	5,492	6,540	5,844
VIVERO SURATA	6,782	6,266	5,403	4,232	4,120	4,416	5,078	5,033	4,669	4,277	5,028	5,920	5,102
PROVINCIA [23195170]	7,166	6,392	5,203	4,889	5,343	5,630	6,418	5,739	5,516	4,798	5,501	6,669	5,772
CACHIRI [23195200]	6,890	6,286	5,612	4,481	4,373	4,985	5,474	5,010	4,425	3,974	4,703	6,012	5,185
STA ROSA D SIMITI	7,996	7,135	5,397	4,019	4,281	5,426	6,507	6,142	4,881	4,176	4,899	6,591	5,621
CANELOS [23205050]	5,936	5,298	3,775	2,875	3,530	4,049	5,385	5,324	3,880	3,509	3,931	5,073	4,380
AGUAS CLARAS [23215030]	8,115			4,921	5,033	5,808	6,563	6,230		5,310	5,724	6,922	6,070
MONTERREY FORESTAL	8,695	8,234	7,087	6,376	5,485	6,606	7,251	6,998	5,829	5,573	6,265	7,408	6,817
APTO RAFAEL BARVO	7,647	7,232	6,077	4,881	4,553	5,631	6,071	5,742	4,635	4,715	5,224	6,733	5,762
APTO LAS FLORES	8,458	8,119	6,917		5,639	6,591	7,129	7,061	6,062	5,689	6,196	7,702	6,869

NECHI [25025140]	7,270	6,094	6,016	5,238	5,571		6,319	6,273	5,837			6,474	6,121
AYAPEL [25025150]	5,872	5,353	4,391	3,882	4,174		5,603	5,232	4,639	4,469	4,585	5,025	4,839
SAN BENITO ABAD	8,194	7,657	6,228	5,670	5,230	6,300			5,727	5,734	6,035	7,187	6,396
PLANETA RICA [25025190]	6,354	6,044	5,001	4,340		4,938	5,506	5,565	4,630	4,728	5,197	5,739	5,277
MAJAGUAL [25025240]	6,904	6,734	5,347	4,515			6,171	5,927	4,969	4,934	5,639	5,794	5,693
CHIRIGUANA [25025250]	8,840	8,396	6,964	6,399	5,830	6,661	7,301	7,074	6,227	6,111	6,811	7,884	7,042
UNISUCRE [25025270]	7,280	6,833	5,717	4,800	4,393	5,479	6,000	5,516	4,667	4,431	4,844	6,030	5,499
LOS ALAMOS [25025320]	8,474	8,260	7,011	6,119	5,842	6,741	7,388	6,995	6,019	6,190			6,904
CACAOTERAS DEL DIQ	6,696	6,071	5,663	5,098	5,005	5,701	6,482	6,295	5,496	5,264	5,491	5,802	5,755
URUMITA [28015070]	8,586	8,206		5,772	5,561	5,898	6,661	6,133	5,539	5,526	6,381	7,233	6,500
SAN JOSE D ORIENTE	7,906	7,766	7,181	5,765			6,053	5,592	5,112	5,319	5,706	7,020	6,342
MOTILONIA CODAZZI	9,026	8,356	7,171	6,344	5,806	6,126	6,624	6,493	5,926	5,926	6,866	8,045	6,892
VILLA ROSA [28035010]	9,011	8,580	7,735		5,911	6,131	6,797	6,626	6,153	5,953	6,768	7,975	7,058
APTO ALFONSO LOPEZ	9,161	8,865	7,774	6,828	6,230	6,863	7,141	6,841	6,325	6,378	7,298	8,469	7,348
GUAYMARAL [28035040]	8,655	8,347	7,611	6,749	6,054	6,158	6,835	6,847	6,004	5,816	6,684	7,834	6,966
CARMEN DE BOLIVAR	7,609	7,236	5,906	5,219	4,835	5,490	6,584	5,772	4,622	4,501	5,454	6,197	5,785
PRESA AY GRANDE	7,423	6,625	5,434			4,782	5,486		4,141	4,238	5,045	6,585	5,529
REPELON [29035070]	8,307	8,023	7,074	6,097	5,203	5,763	6,488	6,166	5,068	4,791	5,625	7,025	6,303
NORMAL MANATI	7,912	7,428	6,405	5,607	5,146	5,591	6,277	6,023	4,924	4,825	5,409	6,703	6,021
SAN PABLO [29035110]	8,353	7,757	6,440	5,676	4,947	5,531	6,186	5,707	4,704	4,630	5,403	7,156	6,041
LIMON EL [29035120]	8,704	8,231	7,382	6,381	5,587	5,986	6,570	6,397	5,418	5,158	6,045	7,521	6,615
A.E CORTISSOZ [29045020]	9,160	8,813	7,843	6,968	6,138	6,709	7,104	6,705	5,682	5,451	6,244	7,980	7,066
ZACAPA [29065010]	7,783	7,855	6,436	6,027	5,733	5,665	6,492	6,151	5,351	5,355	6,419	7,242	6,376
PADELMA [29065020]	8,325	8,001	6,799	6,328	5,746	6,042	6,304	5,922	5,467	5,881	6,286	7,460	6,547
PRADO SEVILLA	8,111	8,242	6,842	6,450	5,878	6,056	6,334	6,166	5,563	5,800	6,324	6,766	6,544

ANEXO 3

Tabla 16. Localización y periodo de registro de las 17 estaciones de irradiación seleccionadas del IDEAM. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.

Código	Estación	Altitud	Latitud	Longitud	Periodo de registro
21115020	APTO BENITO SALAS	439	2,949	-75,293	1990-2003
21205791	APTO EL DORADO	2547	4,706	-74,151	1981-2004
26135040	APTO MATECANA	1199	4,816	-75,737	1990-1996
17015010	APTO SESQUICENTEN	1	12,542	-81,731	2001-2003
24025020	CUCHARO EL [24025020]	975	6,532	-73,199	1991-2002
34015010	GAVIOTAS LAS [34015010]	171	4,554	-70,930	1989-2001
28025070	MOTILONIA CODAZZI	180	10,002	-73,249	1986-1995
23075010	RIO CLARO [23075010]	449	5,856	-74,848	1987-1989
21205420	TIBAITATA [21205420]	2543	4,691	-74,209	1992-2004
21205012	UNIV NACIONAL [21205012]	2556	4,638	-74,089	2014-2017
21255160	HACIENDA PAJONALES [21255160]	277	4,761	-74,834	2005-2017
24015110	LA BOYERA - AUT [24015110]	2610	5,304	-73,852	2005-2011
26125300	CALARCA - AUT [26125300]	2255	4,528	-75,596	2009-2017
26155230	EMAS - AUT [26155230]	2211	5,085	-75,507	2005-2017
28035060	FEDEARROZ - AUT [28035060]	184	10,464	-73,248	2005-2017
48015010	A VASQUEZ COBO	84	-4,194	-69,941	2014-2016
21015030	PARQUE ARQUEOLOGIC	1800	1,888	-76,295	1990-2003

ANEXO 4

En la Figura 42 se presentan los valores medios del ciclo anual de brillo solar para cada región hidrográfica. Y en la Figura 43 se muestran los valores medios del ciclo anual de brillo solar de cada estación para las regiones hidrográficas.

Magdalena Cauca

La región Magdalena-Cauca se encuentra ubicada en la zona andina colombiana, abarcando los departamentos más poblados localizados en el centro del país. En su área total de 271.118,10 km² se encuentran 163 estaciones de brillo solar, con una buena cobertura y densidad.

El ciclo anual de brillo solar para esta región presenta un comportamiento bimodal marcado por dos periodos de menor intensidad en los trimestres MAM y SON, y picos de mayor intensidad en los meses de julio-agosto y diciembre-enero, siendo el último el de valores más altos. Los valores mensuales promedio de duración de luz solar se encuentran en el rango de 4,3 a 6,2, altos en comparación con las demás regiones.

Caribe

La región Caribe está ubicada en el norte del país, y abarca algunas franjas en el oriente y occidente. Incluye parte de los territorios de los departamentos de La Guajira, Cesar, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Antioquia, Chocó y Norte de Santander. Tiene una extensión de 102.863,18 km² en los cuales se distribuyen 33 estaciones de brillo solar.

Sus valores promedio de horas de luz solar se encuentran entre las 4,6 y 6,2 horas. Se esperaría que la región tuviese valores más altos de duración de luz solar al poseer la zona con más potencial de generación de energía solar del país: La Guajira (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). Sin embargo, la delimitación del Caribe acoge parte del departamento de Chocó, que presenta valores bajos de irradiación al tener una alta nubosidad en todo el año, y otras zonas como parte del Norte de Santander, que disminuyen los valores promedio mensuales esperados para el norte del país.

Como se mencionó anteriormente, el comportamiento de las horas promedio mensuales de luz solar, reflejan de forma cualitativa la cobertura nubosa y, por ende, el favorecimiento de precipitaciones en la región. Teniendo en cuenta la correlación entre estas variables, el norte de Colombia presenta un comportamiento bimodal de la precipitación durante el año, inferido a partir del ciclo de brillo solar de la región representado en la Figura 42; siendo muy similar al encontrado para la región Magdalena-Cauca, con valores más bajos en los trimestres MAM y SON, y el último de ellos presentando los valores más altos de duración de brillo solar.

Pacífico

Esta región está localizada en la franja occidental del territorio colombiano, y comprende gran parte de los departamentos de Chocó, Valle del Cauca, Cauca, Nariño y Risaralda,

con un área total de 77.301,82 km². En ella se encuentran 29 estaciones de brillo solar distribuidas en el sur y centro de la región.

Se observa que, para esta región, los valores son bajos en comparación con la mayoría de las regiones, oscilando entre las 3,2 y 4,3 horas promedio de duración de brillo solar. Este comportamiento infiere, de forma parcial, que existe una alta cobertura nubosa en el occidente colombiano generada por la Corriente de Chorro del Chocó (Poveda, 2004).

Adicionalmente, esta región presenta un comportamiento unimodal en su ciclo anual de irradiación, en el cual se evidencian valores no muy variables durante todos los meses del año, salvo por un periodo de mayor intensidad comprendido entre los meses julio y agosto.

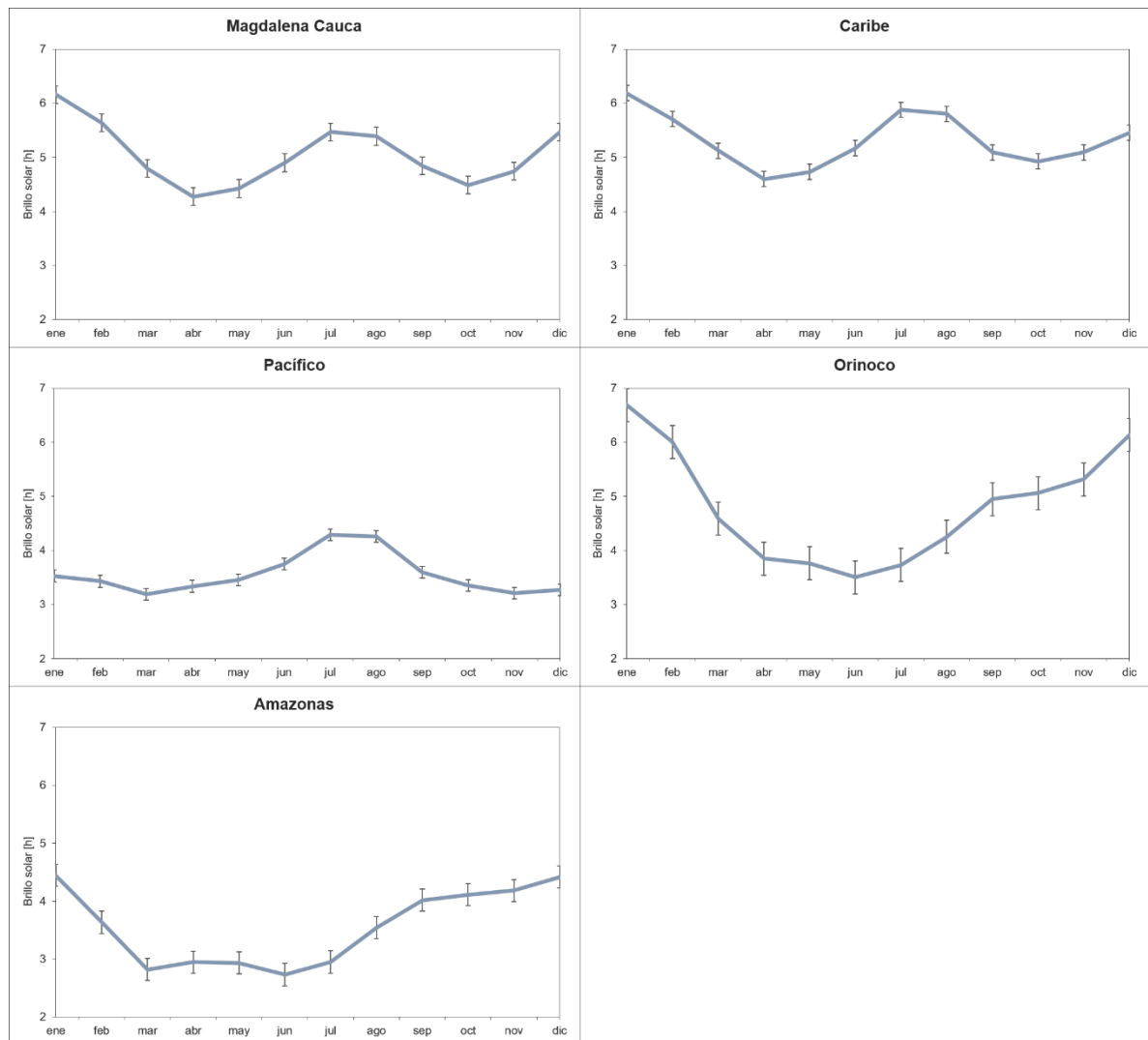


Figura 42. Valores medios del ciclo anual de brillo solar para las regiones hidrográficas expresados en h/día.

Orinoco

La región del Orinoco está ubicada en el oriente del país, y comprende los departamentos de Arauca, Casanare y Vichada, y parte de los departamentos de Meta, Guainía, Guaviare, Boyacá y Cundinamarca. Posee 347.208,26 km² de área, lo que la convierte en la región de mayor extensión. En ella se encuentran 25 estaciones de brillo solar, casi todas concentradas en el occidente de la región.

Presenta un comportamiento unimodal en el ciclo anual de brillo solar, con un periodo de baja intensidad en los meses mayo-junio-julio (MJJ), y valores pico de gran intensidad en los meses de diciembre y enero. Sus valores oscilan entre las 3,5 y 6,7 horas de luz solar, siendo el último el promedio mensual multianual más alto entre todas las regiones, correspondiente al mes de enero.

Amazonas

Comprende los departamentos del Amazonas, Caquetá y Putumayo, y parte de los departamentos de Vaupés, Guaviare, Guainía, Cauca, Nariño y Meta. En sus 341.991,29 km² de extensión están localizadas 16 estaciones de brillo solar, con crítica deficiencia de cobertura en el sur, oriente, occidente y centro.

Al igual que el Pacífico, presenta valores bajos de irradiación en comparación con las demás regiones, los cuales oscilan entre 2,7 y 4,4 horas. Registra el valor promedio mensual más bajo entre todas las regiones, que corresponde al mes de junio, en el que se presume que hay presencia de una cantidad significativa de nubes. El Amazonas presenta un comportamiento unimodal, con los valores promedios más bajos en el año en los meses marzo-abril-mayo-junio (MAMJ) y un pico máximo en los meses de diciembre y enero.

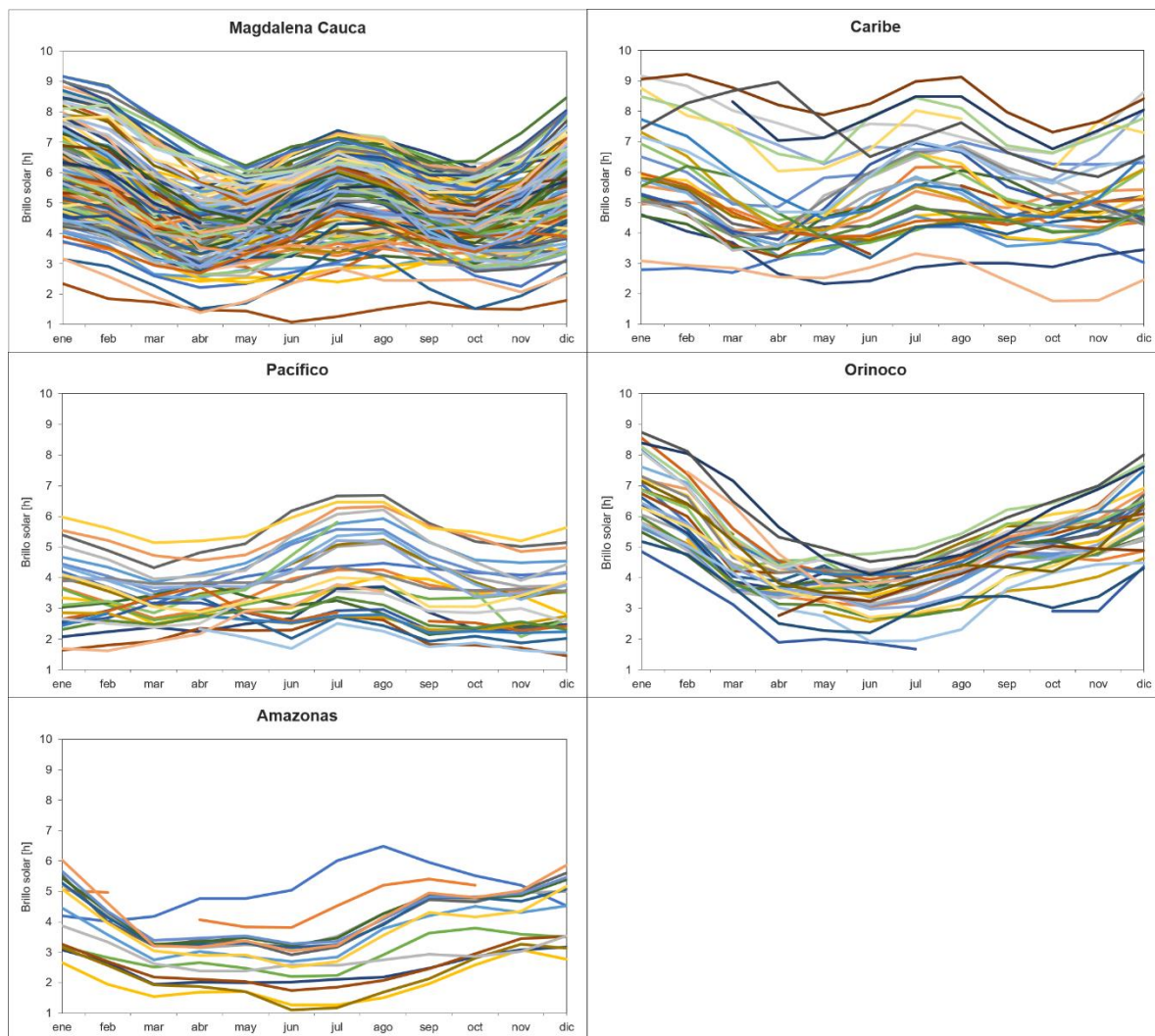


Figura 43. Valores medios del ciclo anual de brillo solar de cada estación para las regiones hidrográficas expresados en h/día.

En la Figura 43 se muestran los valores medios del ciclo anual de brillo solar de cada estación para las regiones hidrográficas. En cada una de las gráficas, las diferentes series de colores corresponden a estaciones específicas ubicadas dentro de una región, y la discontinuidad de algunas series se debe a los datos faltantes o depurados en el proceso previamente descrito dentro del Tratamiento de información.

Se puede observar la baja cobertura de estaciones que evidencian algunas regiones, principalmente Caribe y Amazonas, en las cuales su ciclo anual puede estar modulado por el comportamiento de aquellas estaciones que no necesariamente reflejan el comportamiento climático de la región.

ANEXO 5

Tabla 17. Localización de las 50 estaciones de brillo solar del primer conjunto de validación. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.

Código	Estación	Altitud	Latitud	Longitud
47015080	MONOPAMBA [47015080]	1776	0,805	-77,304
52055010	APTO SAN LUIS [52055010]	2961	0,857	-77,678
52055030	BOMBONA [52055030]	1493	1,184	-77,465
51025010	GRANJA EL MIRA	16	1,550	-78,696
52025050	SIERRA LA [52025050]	1870	2,194	-76,750
26035070	CARPINTERIAS HDA	2500	2,467	-76,933
26025070	GABRIEL LOPEZ	371	2,510	-76,289
32105070	SAN JOSE GUAVIARE	165	2,553	-72,647
21085030	SAN RAFAEL [21085030]	1030	2,760	-75,583
21055040	TOEZ [21055040]	1860	2,817	-76,083
21115100	PALACIO-VEGALARGA	1100	2,943	-75,066
21135020	JABALCON [21135020]	332	3,856	-75,016
35045020	CABANA LA HDA	305	4,300	-73,358
21215140	CEMENTOS DIAMANTE	780	4,331	-75,081
35105020	BARRANCA DE UPIA	225	4,567	-72,967
21205230	OBS MET NACIONAL	2556	4,633	-74,100
54085010	NOANAMA [54085010]	28	4,688	-76,934
21206050	ESC COL INGENIERIA	2650	4,783	-74,050
21255080	SALTO EL [21255080]	1139	4,784	-74,768
26135040	APTO MATECANA	1199	4,816	-75,737
35065010	GACHETA [35065010]	1752	4,830	-73,646
26145030	CAMELIA LA [26145030]	1736	5,079	-75,967
23025040	ALBANIA [23025040]	788	5,286	-74,903

35215010	APTO YOPAL [35215010]	325	5,320	-72,388
35085020	RONDON [35085020]	2120	5,358	-73,204
23035020	APTO PALANQUERO	172	5,471	-74,655
23125100	BUENAVISTA [23125100]	2200	5,515	-73,943
35095030	TUNEL EL [35095030]	3000	5,575	-72,948
26175040	TUNEZ HDA [26175040]	604	5,800	-75,651
24035120	SURBATA BONZA	2485	5,802	-73,074
24025030	SIERRA LA [24025030]	2700	5,966	-73,164
24025050	CHARALA [24025050]	1350	6,274	-73,151
27015210	VIVERO EL [27015210]	2400	6,283	-75,500
23085210	VIOLETAS LAS [23085210]	1016	6,349	-75,003
24025040	ESC AGR MOGOTES	1673	6,470	-72,969
26225030	COTOVE HDA [26225030]	534	6,534	-75,827
24055030	ZAPATOCA [24055030]	1810	6,793	-73,283
23195090	VIVERO SURATA	1725	7,366	-72,988
16015100	RAGONVALIA [16015100]	1550	7,577	-72,484
12015060	TULENAPA [12015060]	39	7,774	-76,666
16015010	APTO CAMILO DAZA	250	7,930	-72,509
16055100	UNIV FCO P SANTAND	1150	8,238	-73,322
13085010	DOCTRINA LA [13085010]	20	9,297	-75,893
25025270	UNISUCRE [25025270]	160	9,316	-75,388
13095020	PRIMATES [13095020]	200	9,530	-75,351
29035070	REPELON [29035070]	10	10,490	-75,127
29065030	PRADO SEVILLA	18	10,764	-74,155
29045020	A.E CORTISSOZ [29045020]	14	10,918	-74,780
15015060	SAN LORENZO [15015060]	2200	11,111	-74,055
17025020	APTO EL EMBRUJO	7	13,360	-81,358

ANEXO 6

Tabla 18. Localización de las 50 estaciones de brillo solar del segundo conjunto de validación. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.

Código	Estación	Altitud	Latitud	Longitud
52055090	SINDAGUA [52055090]	2800	1,108	-77,389
44015040	MOCOA ACUEDUCTO	650	1,157	-76,652
47015090	PRIMAVERA LA [47015090]	2067	1,168	-76,933
46035010	MAGUARE [46035010]	270	1,640	-75,163
44015030	VALENCIA [44015030]	2900	1,900	-76,669
53045010	BONANZA [53045010]	10	2,567	-77,883
21085030	SAN RAFAEL [21085030]	1030	2,760	-75,583
26055050	POTRERITO [26055050]	125	3,243	-76,592
26065010	ING CAUCA [26065010]	13	3,269	-76,347
21145070	LEGIOSA LA [21145070]	1476	3,311	-74,703
21145040	SAN ALFONSO [21145040]	440	3,373	-75,110
32075050	MESETAS [32075050]	620	3,380	-74,043
35015030	SAN CARLOS GUAROA	230	3,717	-73,250
35025020	LIBERTAD LA [35025020]	336	4,057	-73,468
54075040	MISION LA [54075040]	14	4,223	-77,276
21215140	CEMENTOS DIAMANTE	780	4,331	-75,081
21205720	SAN JORGE GJA [21205720]	2900	4,506	-74,189
35105020	BARRANCA DE UPIA	225	4,567	-72,967
21205520	ELDORADO DIDACTICA	2546	4,700	-74,150
21255140	QUINTA LA [21255140]	429	4,822	-74,921
26135110	VERACRUZ [26135110]	17	4,868	-75,628
26185040	SAN FELIX [26185040]	2690	5,373	-75,375
24015300	VILLA DE LEIVA [24015300]	2215	5,656	-73,544
24035340	APTO A LLERAS C [24035340]	2500	5,677	-72,968

24035170	TUNGUAVITA [24035170]	2470	5,746	-73,116
26185020	MESOPOTAMIA [26185020]	2408	5,886	-75,319
27015260	SALADA LA [27015260]	1923	6,048	-75,625
23085220	SAN CARLOS [23085220]	1113	6,158	-75,039
11075010	HONDA LA [11075010]	1850	6,356	-76,158
24035240	SIERRA NEVAD COCUY	3716	6,410	-72,375
24025020	CUCHARO EL [24025020]	975	6,532	-73,199
24035310	CHISCAS [24035310]	2350	6,550	-72,505
23175020	APTO OTU [23175020]	643	7,012	-74,716
23155030	APTO YARIGUIES	126	7,026	-73,809
16015020	ISER PAMPLONA	2340	7,373	-72,645
23195200	CACHIRI [23195200]	1850	7,474	-72,991
12015070	APTO LOS CEDROS	41	7,816	-76,718
12015020	UNIBAN [12015020]	43	7,826	-76,651
16015010	APTO CAMILO DAZA	250	7,930	-72,509
16055010	APTO AGUAS CLARAS	1435	8,315	-73,358
16055090	INS AGR CONVENCION	1076	8,471	-73,344
25025270	UNISUCRE [25025270]	160	9,316	-75,388
25025250	CHIRIGUANA [25025250]	40	9,361	-73,593
28025070	MOTILONIA CODAZZI	180	10,002	-73,249
28025040	SAN JOSE D ORIENTE	850	10,350	-73,050
29035120	LIMON EL [29035120]	7	10,417	-75,067
14015030	ESC NAVAL CIOH	1	10,447	-75,516
15015060	SAN LORENZO [15015060]	2200	11,111	-74,055
15015050	APTO SIMON BOLIVAR	4	11,128	-74,229
15065010	APTO ALM. PADILLA	4	11,530	-72,918

ANEXO 7

Tabla 19. Localización de las 50 estaciones de brillo solar del tercer conjunto de validación. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.

Código	Estación	Altitud	Latitud	Longitud
48015010	A VASQUEZ COBO	84	-4,194	-69,941
47015080	MONOPAMBA [47015080]	1776	0,805	-77,304
52055010	APTO SAN LUIS [52055010]	2961	0,857	-77,678
52055020	PARAISO EL [52055020]	3120	1,071	-77,637
52055030	BOMBONA [52055030]	1493	1,184	-77,465
47015040	MICHOACAN [47015040]	2100	1,198	-76,961
52045020	APTO ANTONIO NARIÑO	1796	1,394	-77,291
52065020	BARBACOAS [52065020]	32	1,673	-78,135
52015020	FONDA LA CITEC	580	2,146	-77,046
21055030	STA LETICIA [21055030]	2085	2,241	-76,164
21095010	JUNCAL EL [21095010]	460	2,829	-75,331
21125010	STA MARIA [21125010]	1300	2,936	-75,589
21115100	PALACIO-VEGALARGA	1100	2,943	-75,066
32075030	VISTA HERMOSA	325	3,120	-73,754
22055020	MESA DE POLE [22055020]	699	3,456	-75,536
26075010	PALMIRA ICA [26075010]	118	3,513	-76,315
26075100	GJA EXP HOESCHST	950	3,633	-76,433
21165010	PST DE MONTA [21165010]	321	3,788	-74,917
21165030	LOZANIA [21165030]	394	3,898	-74,772
26125130	CUMBARCO [26125130]	1749	4,185	-75,832
21205720	SAN JORGE GJA [21205720]	2900	4,506	-74,189
33055010	CUMARIBO [33055010]	167	4,495	-69,803
35105020	BARRANCA DE UPIA	225	4,567	-72,967
26135040	APTO MATECANA	1199	4,816	-75,737

26135110	VERACRUZ [26135110]	17	4,868	-75,628
26145030	CAMELIA LA [26145030]	1736	5,079	-75,967
35085020	RONDON [35085020]	2120	5,358	-73,204
23125100	BUENAVISTA [23125100]	2200	5,515	-73,943
11045010	APTO EL CARANO	75	5,691	-76,644
11025010	MANSA LA [11025010]	2018	5,878	-76,084
24035250	CHITA [24035250]	2888	6,188	-72,466
27015210	VIVERO EL [27015210]	2400	6,283	-75,500
24035240	SIERRA NEVAD COCUY	3716	6,410	-72,375
23085080	NUS GJA EXP EL [23085080]	859	6,484	-74,837
24035400	VOLCAN EL [24035400]	2841	6,845	-72,678
23175020	APTO OTU [23175020]	643	7,012	-74,716
24065030	TRIGUEROS HDA	400	7,077	-73,358
37015020	BERLIN [37015020]	3214	7,187	-72,869
37015010	SILOS [37015010]	2765	7,208	-72,753
23195090	VIVERO SURATA	1725	7,366	-72,988
16015090	TAMA PARQUE NAL	2500	7,424	-72,442
12015070	APTO LOS CEDROS	41	7,816	-76,718
16025040	CINERA-VILLA OLGA	100	8,168	-72,469
23215030	AGUAS CLARAS [23215030]	208	8,229	-73,603
16055010	APTO AGUAS CLARAS	1435	8,315	-73,358
25025240	MAJAGUAL [25025240]	26	8,543	-74,627
29015020	CARMEN DE BOLIVAR	152	9,716	-75,106
29035110	SAN PABLO [29035110]	20	10,043	-75,259
29065010	ZACAPA [29065010]	30	10,583	-74,250
15015060	SAN LORENZO [15015060]	2200	11,111	-74,055

ANEXO 8

Tabla 20. Localización de las 26 estaciones de brillo solar e irradiación del IDEAM. La altitud, expresada en m.s.n.m., y la latitud y longitud, en grados decimales.

Código	Estación	Altitud	Latitud	Longitud
21185030	GUAMO [21185030]	3319	4,009	-74,981
21205420	TIBAITATA [21205420]	2543	4,691	-74,209
21245040	APTO PERALES [21245040]	943	4,424	-75,139
23035020	APTO PALANQUERO	172	5,471	-74,655
23075010	RIO CLARO [23075010]	449	5,856	-74,848
23195130	APTO PALONEGRO	1189	7,121	-73,185
24015300	VILLA DE LEIVA [24015300]	2215	5,656	-73,544
24025020	CUCHARO EL [24025020]	975	6,532	-73,199
24025030	SIERRA LA [24025030]	2700	5,966	-73,164
24035120	SURBATA BONZA	2485	5,802	-73,074
24035130	U P T C [24035130]	2690	5,543	-73,361
24035150	BELENCITO [24035150]	2530	5,782	-72,894
26095230	VINCULO EL [26095230]	981	3,835	-76,300
26135040	APTO MATECANA	1199	4,816	-75,737
27015070	A. OLAYA HERRERA	1516	6,221	-75,589
52045010	OBONUCO [52045010]	2710	1,198	-77,303
52055010	APTO SAN LUIS [52055010]	2961	0,857	-77,678
35035020	APTO VANGUARDIA	422	4,162	-73,618
37055010	APTO ARAUCA [37055010]	128	7,069	-70,738
44135010	ARARACUARA [44135010]	150	-0,616	-72,382
48015010	A VASQUEZ COBO	84	-4,194	-69,941
15065010	APTO ALM. PADILLA	4	11,530	-72,918
16025040	CINERA-VILLA OLGA	100	8,168	-72,469
25025350	PUERTA ROJA AUTOMATICA	160	9,316	-75,388
28025070	MOTILONIA CODAZZI	180	10,002	-73,249
29065030	PRADO SEVILLA	18	10,764	-74,155

